

Méthodes d'estimation et d'optimisation des quantités de terres polluées à traiter

Retour d'expérience sur la validité des estimations à partir de données réelles



**METHODES D'ESTIMATION ET D'OPTIMISATION
DES QUANTITES DE TERRES POLLUEES A TRAITER**

**RETOUR D'EXPERIENCE SUR LA VALIDITE
DES ESTIMATIONS A PARTIR DE DONNEES REELLES**

RAPPORT FINAL

mai 2016

N. JEANNEE, C. FAUCHEUX – GEOVARIANCES
H. DEMOUGEOT-RENARD – eOde



Créée en 1989 à l'initiative du Ministère en charge de l'Environnement, l'association RECORD – REseau COopératif de Recherche sur les Déchets et l'Environnement – est le fruit d'une triple coopération entre industriels, pouvoirs publics et chercheurs. L'objectif principal de RECORD est le financement et la réalisation d'études et de recherches dans le domaine des déchets et des pollutions industrielles.

Les membres de ce réseau (groupes industriels et organismes publics) définissent collégalement des programmes d'études et de recherche adaptés à leurs besoins. Ces programmes sont ensuite confiés à des laboratoires publics ou privés.

Avertissement :

Les rapports ont été établis au vu des données scientifiques et techniques et d'un cadre réglementaire et normatif en vigueur à la date de l'édition des documents.

Ces documents comprennent des propositions ou des recommandations qui n'engagent que leurs auteurs. Sauf mention contraire, ils n'ont pas vocation à représenter l'avis des membres de RECORD.

- ✓ Pour toute reprise d'informations contenues dans ce document, l'utilisateur aura l'obligation de citer le rapport sous la référence :
RECORD, Méthodes d'estimation et d'optimisation des quantités de terres polluées à traiter. Retour d'expérience sur la validité des estimations à partir de données réelles, 2016, 162 p, n°14-0515/1A
- ✓ Ces travaux ont reçu le soutien de l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie)
www.ademe.fr

© RECORD, 2016

RESUME

L'estimation des quantités de terres à dépolluer est une préoccupation majeure des acteurs de la gestion des sites et sols pollués. En effet, les écarts avec les quantités réellement dépolluées ont des conséquences importantes en termes financiers (p.ex. dépassement de budget), temporels (p.ex. retards pris sur les travaux de reconversion de sites), sanitaires et environnementaux (p.ex. risque d'exposition en cas de pollution résiduelle). Or de nombreux facteurs conduisent à des écarts parfois significatifs entre diagnostic et dépollution : complexité du contexte de pollution, caractérisation insuffisante, méthode d'estimation des quantités inappropriée, etc.

Par rapport à ce contexte, l'étude identifie, sur la base d'un retour d'expérience sur 23 jeux de données industrielles et d'une enquête préalable auprès de professionnels des sites et sols pollués, les méthodologies les plus pertinentes pour optimiser les estimations des quantités de terres à dépolluer. L'étude fournit de plus des résultats chiffrés des écarts observés en situation réelle, qui viennent conforter les impressions ressenties par les professionnels dans le cadre de leur activité.

Les résultats obtenus conduisent à des recommandations opérationnelles visant à améliorer la qualité des prédictions de quantités de terres/polluants en phase diagnostic. Elles concernent les conditions d'investigation, les méthodes d'estimation et leurs conditions de mise en œuvre, l'influence de la complexité des situations de pollution et l'intensité des contrôles en cours de dépollution. La pertinence de ces recommandations a été assurée par l'implication d'une quinzaine d'acteurs reconnus pour leur expertise dans le domaine des sites et sols pollués.

MOTS CLES sites et sols pollués, diagnostic, estimation de quantités, erreurs de prédiction, réconciliation, retour d'expérience, méthodes empiriques, interpolation déterministe, géostatistique, excavation, traitement sur site / *in situ*.

SUMMARY

Assessing soil quantities to be remediated is a major concern in contaminated land management. Indeed, discrepancies between estimates obtained during the characterization stage and the quantities actually remediated have important implications in financial terms (e.g. on budget), scheduling (e.g. delays) or health and environmental aspects (e.g. exposure risk in case of residual pollution). However, many factors lead to potentially significant differences between characterization and remediation results: complexity of pollution, inadequate characterization methodology, improper approach for estimating contaminated quantities, etc.

Within this framework, the project aims at identifying the most appropriate methodologies to optimize the estimation of contaminated soils. It relies on a feedback derived from industrial data sets and a qualitative survey among professionals involved in contaminated land management. The study further provides quantitative results on the differences observed in real situations, which clearly reinforce the impressions felt by the professionals.

The results lead to operational recommendations in order to improve the quality of predictions of contaminated quantities at characterization stage. They are related to the investigation conditions/requirements, the estimation methods and their conditions of use, the influence of the complexity of pollution and finally the intensity of controls performed during the remediation itself. The relevance of these recommendations has been ensured by the involvement of fifteen actors recognized for their expertise in the area of contaminated land management.

KEY WORDS contaminated sites, characterization, pollutant mass, soil volume, prediction error, reconciliation, experience feedback, empirical methods, deterministic interpolation, geostatistics, excavation, *in situ* / on site treatment.

REMERCIEMENTS/ACKNOWLEDGEMENTS

Comité de suivi / Pilot Committee : R. Bayard, Ph. Botella, J.-P. Cazalets, J.-M. Cormier, L. Cimolino, B. Couffignal, F. Decung, D. François, L. Geneau, P. Jolly, G. Lanfrey, C. Ollivier-Delahaye, V. Restoin, H. Romano, H. Roussel, E. Serre.

Comité d'experts / Expert Committee : S. Belbèze, A. Blusseau, J.-M. Côme, V. Croze, M. Garcia, L. Rouvreau.

Questionnaire / Survey : C. Badertscher, S. Belbèze, J.-F. Blanchard, A. Blusseau, Ph. Botella, H. Casez, J.-M. Côme, V. Croze, M. Garcia, A. Indaco, T. Jumeau, S. Kaskassian, V. Milon, E. Servant, J.-L. Sévêque.

Les auteurs remercient finalement chaleureusement l'ensemble des organismes fournisseurs de cas.

SOMMAIRE

1.	Introduction	6
1.1.	Objectifs	6
1.2.	Cadre et limites de l'étude	6
1.3.	Travail réalisé	7
1.4.	Organisation du rapport	7
2.	Contexte.....	8
2.1.	Contexte réglementaire	8
2.2.	Principales méthodes d'estimation appliquées aux sites pollués.....	8
2.3.	Typologie des sites pollués et de leur traitement en France et en Europe	11
3.	Méthodes et matériel	12
3.1.	Méthodologie générale	12
3.2.	Enquête par questionnaire qualitatif	12
3.3.	Sélection des cas.....	12
3.4.	Méthodologie de description des cas	13
3.5.	Méthodologie d'analyse des cas	15
3.6.	Evaluation par un comité d'experts externes.....	19
4.	Présentation des résultats	20
4.1.	Questionnaire qualitatif	20
4.2.	Description synthétique des cas.....	25
4.3.	Analyse comparative des cas	31
5.	Synthèse et recommandations	37
5.1.	Synthèse	37
5.2.	Recommandations.....	38
5.3.	Retour sur les cas d'étude	42
6.	Conclusion	46
	Bibliographie	47
	Annexe A : Notions géostatistiques.....	49
	Annexe B : Fiches de cas.....	59
	Preliminaire : Abréviations utilisées dans les fiches	59
	Site A - Ancienne blanchisserie – PCE – Excavation et venting	60
	Site C – Ancienne usine de fabrication automobile – TCE - Venting.....	71
	Site D – Ancienne usine à gaz – HAP – Excavation.....	75
	Site E – Ancien atelier de créosotage – HAP – Excavation.....	82
	Site F – Activité industrielle – TCE – Biodégradation in situ	86
	Site H - Ancienne activité industrielle – HAP, Benz(a)pyrène et Naphtalène – Excavation	95
	Site I – Dépôt pétrolier – HCT/BTEX – Excavation + bioterte	99
	Site J – Ancienne chaufferie – Hydrocarbures – Excavation + Bioremédiation in situ	102
	Site L – Ancienne activité industrielle – Métaux lourds, Chlorobenzènes, COHV – Excavation	113

Site M – Ancienne usine de fabrication automobile – HC, HAP, COHV, BTEX, Métaux - Excavation	116
Site N – Ancienne activité industrielle – Métaux et hydrocarbures – Excavation	121
Site O – Ancienne station-service – Hydrocarbures – Excavation + Bioterre	124
Site P – Ancienne usine de métaux précieux – HC – Excavation et biotraitement sur site.....	128
Site Q – Ancien bâtiment industriel de chaudronnerie – Hydrocarbures pétroliers - Excavation ...	137
Site R – Station de lavage et station-service – Hydrocarbures pétroliers, HAP et BTEX – Excavation	141
Site S – Dépôt pétrolier – Hydrocarbures – Excavation et traitement sur site (biopile).....	145
Site T – Ancien dépôt pétrolier – Hydrocarbures et HAP – Excavation.....	148
Site U – Dépôt pétrolier et usine de bitumes émulsionnés – Hydrocarbures lourds et HAP – Excavation + Traitement sur site (Biopile)	152
Site V – Ancienne usine de bitumes et émulsions – Hydrocarbures pétroliers lourds et HAP – Excavation.....	155
Site W – Ancienne usine de bitume et d'émulsions – Hydrocarbures lourds et HAP - Excavation et biotraitement.....	159

1. Introduction

1.1. Objectifs

L'économie globale d'une opération de dépollution de site est fortement impactée par la quantité de sol qui sera excavée, traitée, puis valorisée ou éliminée. L'estimation de ces quantités est ainsi une préoccupation majeure des acteurs de la gestion des sites et sols pollués, car les écarts avec les quantités réellement dépolluées ont des conséquences importantes en termes financiers (p.ex. dépassement de budget), temporels (p.ex. retards pris sur les travaux de reconversion de sites), sanitaires et environnementaux (p.ex. risque d'exposition en cas de pollution résiduelle).

De nombreux facteurs conduisent à des écarts parfois significatifs entre les volumes de sols ou masses de polluants prédits en phase diagnostic et ceux réellement dépollués en phase chantier : complexité du contexte de pollution, caractérisation insuffisante, méthode d'estimation des quantités inappropriée, etc. Avec l'acquisition de l'expérience, les professionnels de la dépollution ont établi des règles de bonnes pratiques pour la réalisation des diagnostics ; pour autant, des écarts significatifs entre estimations de diagnostic et résultats de la dépollution sont toujours observés et conduisent à l'insatisfaction des donneurs d'ordre. Dans le même temps, les professionnels peinent auprès des mêmes donneurs d'ordre à justifier de l'importance de certaines pratiques en diagnostic (p.ex. multiplication du nombre de points d'échantillonnage pour réduire l'incertitude d'estimation), pour éviter les mauvaises surprises en dépollution.

Par rapport à ce contexte, l'objectif initial de l'étude était de **déterminer, sur la base d'un retour d'expérience sur des jeux de données industrielles, les méthodologies les plus pertinentes** pour l'optimisation de la quantité de terres à dépolluer. Le présent rapport montre que les enseignements tirés de cette comparaison d'estimations de diagnostic et de résultats de dépollution, dépassent largement la question du choix de la méthode d'estimation. Ils concernent également les conditions d'échantillonnage en diagnostic, les modalités de suivi des opérations de dépollution, et les effets de la complexité des situations de pollution sur la précision des estimations. L'étude fournit de plus des **résultats chiffrés** des écarts observés en situation réelle, qui viennent conforter les impressions ressenties par les professionnels dans le cadre de leur activité.

L'équipe de projet a été constituée pour **confronter un double point de vue**, celui du géostatisticien amené à traiter des données de sites et sols pollués, et celui de l'expert sites et sols pollués confronté à la réalisation de diagnostics et de dépollutions. Le travail a été réalisé dans cette optique par les bureaux Geovariances et eOde, spécialisés en géostatistique des sites et sols pollués, puis soumis à l'appréciation d'un **comité d'experts externes** du domaine des sites pollués, issus de bureaux d'études, d'entreprises de dépollution et d'institutionnels (voir § 3.6 Evaluation par un comité d'experts).

En se basant sur l'analyse de jeux de données industrielles, la **concertation** entre les membres de l'équipe de projet (Geovariances, eOde et le comité d'experts) aboutit à un bilan opérationnel de **l'efficacité des méthodes mises en œuvre pour l'optimisation des estimations des quantités de terres à dépolluer**. Les exemples réels mis à disposition du projet montrent des cas d'utilisation de méthodes géostatistiques, déterministes ou empiriques. Des **recommandations** de ce qui « aurait dû être fait » pour améliorer les prédictions de volumes en phase diagnostic sont proposées, permettant aux maîtres d'ouvrage de préciser certains aspects lors de la rédaction de cahiers des charges et de garantir, lorsque les conditions d'application sont réunies, une utilisation concrète et efficace de ces approches au sein des membres de RECORD.

1.2. Cadre et limites de l'étude

L'étude porte sur l'analyse **de 23 jeux de données industrielles**, donnant lieu à **28 comparaisons**, les estimations de diagnostic ayant été menées par plusieurs méthodes sur certains sites.

Des cas de **pollutions chimiques en milieu souterrain** ont été volontairement sélectionnés. Les milieux atteints sont donc essentiellement des sols, ainsi que quelques nappes d'eau souterraine.

L'étude porte sur de nombreux cas de dépollutions impliquant une **excavation des terres**, mais aborde aussi la question de l'estimation des masses de polluants à extraire lorsqu'un **traitement *in situ*** est mis en œuvre. Un cas porte sur un traitement *in situ* d'une nappe d'eau souterraine.

Les jeux de données ont été mis à disposition par des professionnels des sites et sols pollués, avec l'accord des responsables des sites, ou bien par les responsables des sites eux-mêmes. **Les conditions de diffusion de l'information** sur les sites, notamment le respect de clauses de

confidentialité, ont été établies en concertation avec le comité de suivi RECORD et les organismes mettant à disposition les données.

L'étude se base sur une analyse des informations rassemblées sur chacun des jeux de données industrielles. Cette analyse ne comporte **en aucun cas de jugement de valeur** sur la qualité du travail de diagnostic et de dépollution réalisé sur chacun des sites.

1.3. Travail réalisé

Dans le détail, l'étude a comporté les étapes de travail suivantes :

- Une enquête auprès de professionnels des sites et sols pollués pour recueillir leur expérience des écarts observés entre estimations de diagnostic et résultats de dépollution,
- La collecte et la sélection de jeux de données industrielles auprès d'acteurs du domaine,
- L'établissement d'une méthodologie d'analyse des cas,
- L'analyse des cas à proprement parler,
- Une évaluation de l'analyse des cas par un comité d'experts (séminaire du 17 septembre 2015),
- L'élaboration de recommandations opérationnelles.

Le travail a fait par ailleurs l'objet d'un suivi par un comité représentant les membres de l'association RECORD, sous la forme de réunions (réunions de lancement, intermédiaire et finale) et de la remise de rapports intermédiaires.

1.4. Organisation du rapport

Le rapport est organisé en 6 chapitres :

- Après le chapitre 1 d'Introduction, le chapitre 2 positionne l'étude dans le contexte actuel de la gestion des sites pollués, en rappelant les principaux textes réglementaires et méthodologiques en vigueur en France, les différentes méthodes à disposition des praticiens pour estimer les quantités de matériaux ou de polluants en jeu, et la typologie des sites pollués et de leur traitement en France et en Europe.
- Le chapitre 3 décrit la méthodologie d'analyse des jeux de données industrielles, ainsi que les modalités d'enquête sur les écarts usuels entre estimation de diagnostic et résultats de dépollution.
- Le chapitre 4 présente l'analyse des résultats, permettant d'identifier les principaux éléments à l'origine des écarts entre estimations de diagnostic et résultats de dépollution.
- Le chapitre 5 synthétise l'ensemble des résultats acquis afin d'en retirer des recommandations de bonne pratique et de dégager les méthodologies les plus pertinentes pour estimer les quantités de terres à dépolluer (ou de masses de polluants à extraire) ; un retour sur certains cas d'étude clôt ce chapitre.
- Le dernier chapitre, consacré aux conclusions de l'étude, résume les principaux enseignements qui peuvent être tirés de cette analyse de situations réelles.

2. Contexte

L'estimation des quantités de terres à traiter ou des masses de polluants à extraire est une préoccupation majeure des acteurs de la gestion des sites et sols pollués, car les écarts avec les quantités réellement dépolluées ont des conséquences importantes en termes financiers (p.ex. dépassement de budget), temporels (p.ex. retards pris sur les travaux de reconversion de sites), sanitaires et environnementaux (p.ex. risque d'exposition en cas de pollution résiduelle).

Les risques d'erreur d'estimation sont élevés, en raison de la complexité du milieu atteint par la pollution et du petit nombre de données généralement à disposition. Avec l'acquisition de l'expérience, les professionnels de la dépollution ont établi des règles de bonne pratique pour la réalisation des diagnostics. Les **textes réglementaires et guides méthodologiques en vigueur en France** sont rappelés au § 2.1 ci-dessous.

Des écarts « inacceptables » entre estimations de diagnostic et résultats de dépollution, c'est-à-dire conduisant à une insatisfaction des donneurs d'ordre, sont pourtant toujours observés. Dans le même temps, les professionnels peinent à justifier de l'importance de certaines pratiques en diagnostic auprès des donneurs d'ordre, pour éviter les mauvaises surprises en dépollution (p.ex. multiplication du nombre de points d'échantillonnage en phase diagnostic pour réduire l'incertitude d'estimation).

La présente étude consiste à analyser dans le détail les conditions dans lesquelles le diagnostic et la dépollution d'un ensemble de sites ont été réalisés, afin de dégager les raisons du « succès » ou de l'« échec » des opérations, au regard des écarts obtenus entre estimation et résultat effectif de dépollution.

Bien que cela ne soit pas le seul critère à prendre en compte, le choix de la **méthode d'estimation** des quantités à dépolluer semble déterminant dans la réussite d'une opération de dépollution. Plusieurs solutions sont à disposition des professionnels. Elles consistent toutes à estimer (interpoler) les niveaux de pollution en dehors des points de forage et d'échantillonnage. Les méthodes les plus couramment employées sont présentées brièvement au § 2.2 ci-dessous.

L'étude se base sur une vingtaine de jeux de données industrielles mis à disposition par des responsables de sites. Les conclusions de l'analyse des cas ne peuvent être généralisables que s'ils sont représentatifs de la typologie des sites rencontrés en France, ainsi que des pratiques de diagnostic et de suivi de dépollution. Un essai de **typologie des sites français** basé sur une enquête documentaire est présenté au § 2.3.

2.1. Contexte réglementaire

En France, la gestion des sites et sols pollués relève de différents textes réglementaires et guides méthodologiques :

- Les modalités de gestion et de réaménagement des sites et sols pollués relèvent de la **note ministérielle du 8 février 2007** [1] (texte officiel), actuellement en cours de révision,
- Les terres excavées des chantiers de dépollution sont considérées comme des déchets depuis l'entrée en vigueur de l'**ordonnance n°2010-1579 du 17 décembre 2010** (texte officiel),
- Un ensemble de guides et outils utilisés par la profession (« **outils du ministère** ») décrivent les conditions de réalisation des études requises pour mettre en œuvre les démarches d'interprétation des milieux et les plans de gestion,
- Des règles de bonnes pratiques pour réutiliser les terres issues de sites pollués ont été élaborées et décrites par le **BRGM dans un guide méthodologique en février 2012** [3]. Un **guide de caractérisation des terres excavées** dans le cadre de réutilisations hors site paru en décembre 2013 apporte des précisions sur les conditions dans lesquelles la charge polluante des terres peut être évaluée et les quantités en jeu peuvent être estimées [4].

2.2. Principales méthodes d'estimation appliquées aux sites pollués

2.2.1. Brève présentation

Tant la planification des mesures de gestion des sites pollués que la caractérisation des quantités de terres polluées excavées amènent à estimer des quantités de terres polluées ou des masses de polluants, à partir de la connaissance acquise en diagnostic de l'état de pollution des sols.

Pour ce faire, des méthodes d'interpolation doivent généralement être mises en œuvre, pour estimer les concentrations et masses de polluants en dehors des points de forage et d'échantillonnage.

L'absence de connaissance exhaustive de la pollution induit une incertitude sur ces estimations, qu'il est possible de quantifier par certaines de ces méthodes.

Les estimations peuvent intégrer d'autres informations que les analyses chimiques de laboratoire, telles que la connaissance historique de la pollution, des critères organoleptiques, ou bien encore des données renseignant de manière indirecte sur la charge polluante (p.ex. mesures sur site, lithologie, diagraphies MIP).

Trois grands types de méthodes sont utilisés dans la pratique :

- **Des méthodes empiriques**, ou encore basées sur un **jugement d'expert** :
L'évaluation des zones sources ou des zones à excaver repose ici exclusivement sur l'expertise de la personne en charge de la caractérisation. Par comparaison empirique des résultats analytiques obtenus avec les seuils de réhabilitation et en intégrant l'ensemble des informations indirectes disponibles (constats de terrain, type de pollution, historique du site), le professionnel réalise une délimitation manuelle des zones sources, ou des zones à excaver, qui sert ensuite de base au calcul de volumes de terres à excaver (ou de masses de polluants). En dépit d'une subjectivité inéluctable, ces approches sont couramment mises en œuvre en pratique.
- **Des méthodes d'interpolation déterministes** :
Ces méthodes sont disponibles dans de nombreux logiciels de cartographie (SIG, Surfer...) et permettent de tracer des cartes d'isolignes (ou isosurfaces) de concentrations. Les techniques consistent à attribuer au point à estimer une moyenne pondérée des données disponibles les plus proches (p.ex. plus proche voisin, inverse des distances, triangulation de Kolmogorov).

Un exemple est fourni à la figure ci-dessous.

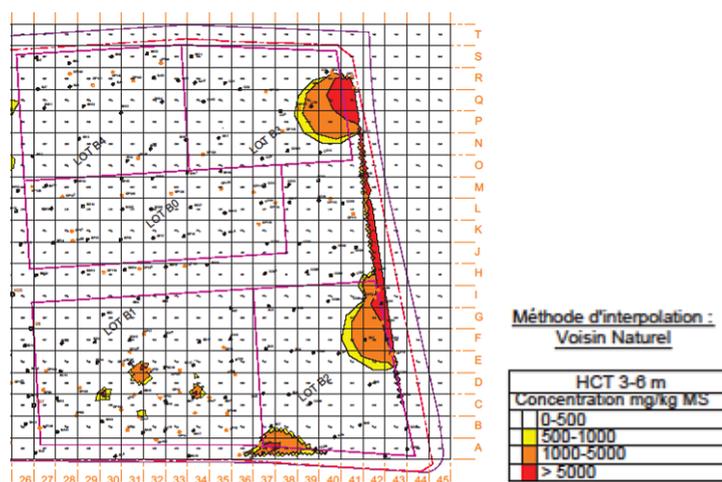


Figure 1 : Carte de la pollution entre 3 et 6 m de profondeur, dessinée avec une méthode d'interpolation déterministe (Voisins Naturels) et SANS lissage des courbes - avec trois iso-contours : 500, 1000 et 5000 ppm (extrait du rapport UPDS [8], voir ci-dessous).

- **Des méthodes géostatistiques** :
Les méthodes géostatistiques reposent sur l'exploitation de la continuité spatiale de la pollution (estimée par le calcul du variogramme) ; leur formalisme probabiliste permet de quantifier l'incertitude associée aux estimations. Parmi ces méthodes, on distingue les techniques classiques de krigeage qui permettent de cartographier une pollution, mais ne sont pas adaptées à l'estimation de zones de dépassement de seuils, et les techniques de simulations conditionnelles, qui permettent de modéliser les quantités de matériaux dont les teneurs dépassent des seuils (estimations globales) et de les localiser dans l'espace (estimations locales), avec une quantification de l'incertitude. Les principales notions de la géostatistique sont rappelées en **Annexe A** de ce rapport. Notons que cette approche inclut très fréquemment une phase d'expertise métier afin de juger de la plausibilité des résultats obtenus.

A titre d'exemple, la figure ci-dessous illustre les principaux éléments d'une étude géostatistique appliquée aux sites pollués. Les principales phases d'une telle approche sont usuellement :

- L'analyse exploratoire et le contrôle qualité des données disponibles, aboutissant à une évaluation de la continuité spatiale de la pollution grâce au variogramme ;
- L'interpolation des concentrations par krigeage (pour une première cartographie de la répartition de la pollution, mais sans l'utiliser pour estimer des quantités) puis l'évaluation de leur variabilité locale via la réalisation de simulations conditionnelles ;
- Le post-traitement des simulations afin d'évaluer le risque local de dépassement de seuils de réhabilitation ainsi que la distribution attendue pour les volumes de terres contaminées. Cette distribution permet ainsi d'évaluer non seulement le volume probable mais également l'incertitude associée à ce volume, souvent décrite par le biais d'un intervalle de confiance.

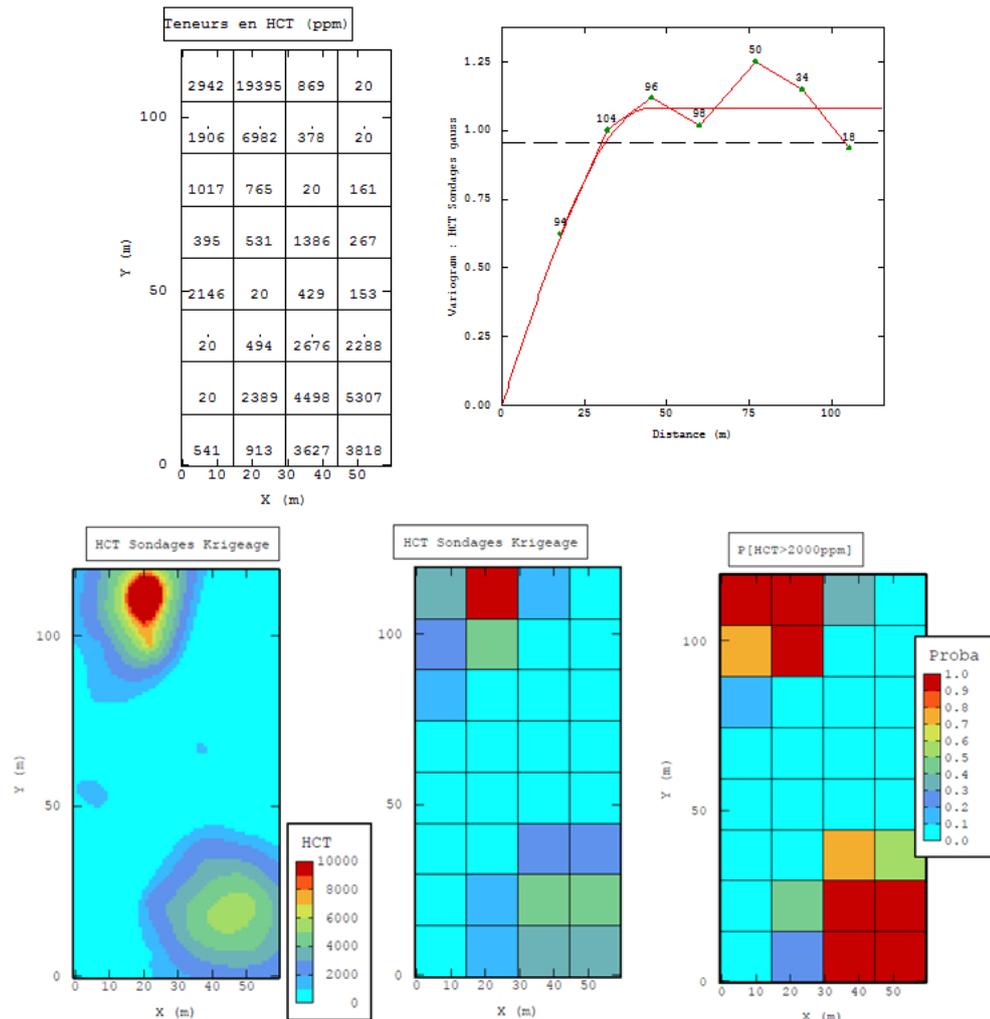


Figure 2 : Exemple géostatistique synthétique (contamination en hydrocarbures d'une couche d'1m de terrain) : carte d'implantation et teneurs en hydrocarbures totaux (en haut à gauche), variogramme (en haut à droite), interpolation par krigeage ponctuel et de bloc (en bas, gauche et milieu), probabilité de dépassement du seuil de 2000 ppm déduite de simulations conditionnelles pour chaque maille envisagée lors du terrassement.

Sur cet exemple, le volume probable de terres présentant des teneurs en hydrocarbures totaux supérieures à 2000 ppm est égal à 2250 m³ ; en outre, ce volume est compris avec un niveau de confiance égal à 90% dans l'intervalle [1800 m³ ; 2925 m³].

Une description plus précise des outils et méthodes géostatistiques adaptés aux sites et sols pollués peut également être trouvée dans le manuel méthodologique GeoSiPol [5], et dans le rapport RECORD sur le retour d'expérience mené sur 15 ans d'application de la géostatistique aux sites et sols pollués [6].

Les approches déterministes comme géostatistiques viennent en général compléter un jugement d'expert initial. De même, les zones polluées peuvent, par exemple, d'abord être délimitées

rapidement par une méthode déterministe automatique, puis ajustées finement à partir de la connaissance acquise sur le terrain de la pollution.

Il est à noter que d'autres méthodes d'interpolation que celles présentées ci-dessus sont adaptées à l'estimation des quantités de matériaux pollués. Des approches plus novatrices, telles que les réseaux de neurones, les approches possibilistes, ou bien encore d'autres méthodes géostatistiques que le krigeage ou les simulations, sont ainsi envisageables. Cependant, la présente étude se restreint volontairement aux méthodes les plus couramment employées dans la pratique.

2.2.2. Document d'information sur les méthodes de délimitation des « pollutions concentrées »

Un groupe de travail de l'UPDS a mené, de juin 2013 à décembre 2014, une réflexion sur les « pollutions concentrées » telles que mentionnées dans l'Annexe 2 de la note ministérielle du 8 février 2007. Ce travail a donné lieu à la publication d'un rapport proposant une définition de la pollution concentrée, ainsi qu'un ensemble de méthodes jugées appropriées pour délimiter la zone concernée : **Rapport UPDS 2014 de synthèse des travaux du GT Pollution concentrées** [8]. Les méthodes sont présentées sous forme de boîte à outils et ont été testées sur différents cas concrets.

Les outils sont destinés à délimiter une zone de pollution concentrée, plutôt qu'à en estimer le volume de matériaux ou la masse de polluants. Il est proposé de baser l'identification de la zone de pollution concentrée sur la convergence de résultats d'au moins deux des méthodes suivantes :

- Méthode N°1 - Interprétation des constats de terrain
- Méthode N°2 - Interprétation cartographique
- Méthode N°3 - Analyse statistique
- Méthode N°4 - Bilan massique
- Méthode N°5 - Détermination de la présence d'une phase organique dans les sols
- Méthode N°6 - Approche géostatistique

Les outils proposés intègrent donc des estimations par jugement d'expert (p.ex. interprétation des constats de terrain), des méthodes déterministes (p.ex. interprétation cartographique) et des modélisations géostatistiques (Méthode N°6).

2.3. Typologie des sites pollués et de leur traitement en France et en Europe

L'étude visant la fourniture d'un retour d'expérience à partir de cas réels, la représentativité de ces derniers par rapport à la typologie des sites pollués rencontrés en France doit être évaluée. Une revue de sources documentaires a permis de recueillir les informations suivantes sur le sujet.

En France, les substances retrouvées dans les anciens sites industriels sont¹ :

- Des hydrocarbures pétroliers (HC) pour 61.4% des 2500 sites recensés dans BASOL,
- Des métaux pour 47.9%,
- Des composés organohalogénés volatils (COHV) pour 31.5%,
- Des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) pour 27.5%,
- Des cyanures pour 6.6%,
- Des composés aromatiques monocycliques (BTEX) pour 3.4%,
- Et d'autres substances (ammonium, chlorures, pesticides...) pour 9.6%.

S'agissant des techniques de dépollution, selon une étude menée en 2012 pour l'ADEME, 57% des sites impliquent une excavation des terres et 18% font l'objet d'un traitement *in situ*.

Au sein de l'Union Européenne, selon les données fournies par l'agence européenne de l'environnement (<http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/progress-in-management-of-contaminated-sites-3/assessment>), il y aurait 75% de dépollutions par excavation et 25% *in situ*. Les sites pollués seraient concernés à 35% par une pollution aux métaux, 24% aux hydrocarbures, 11% aux HAP, 10% aux composés aromatiques monocycliques, 8% aux composés organohalogénés volatils et 9% autres.

¹ Le total dépasse 100% en raison de la coexistence de plusieurs types de polluants sur certains sites.

3. Méthodes et matériel

3.1. Méthodologie générale

Les jeux de données étudiés doivent permettre d'établir un bilan opérationnel de **l'efficacité des méthodes mises en œuvre pour l'optimisation des estimations des quantités de terres à dépolluer**, que ces méthodes soient empiriques, déterministes ou géostatistiques.

Une démarche en phases a été adoptée pour dresser ce bilan :

- Enquête auprès des professionnels pour recueillir leur expérience des écarts observés entre diagnostics et dépollutions,
- Collecte et sélection de cas,
- Description des cas selon une grille d'analyse systématique,
- Analyse comparative des cas,
- Evaluation par un comité d'experts,
- Synthèse, interprétation et recommandations.

L'enquête, menée au moyen d'un questionnaire, est un préalable qui permet de définir le cadre général dans lequel s'insèrent les 23 cas d'étude rassemblés. Elle permet notamment d'apprécier dans quelle mesure ces cas sont représentatifs des situations les plus fréquemment rencontrées par les professionnels des sites et sols pollués.

3.2. Enquête par questionnaire qualitatif

Un questionnaire a été élaboré afin de recueillir l'expérience d'acteurs du domaine des sites et sols pollués (SSP) quant aux problèmes d'incohérences entre diagnostic et dépollution auxquels ils sont confrontés. Bien que par nature subjective et qualitative, cette perception permet d'identifier les principaux obstacles à la bonne concordance entre diagnostics et chantiers de dépollution.

Le questionnaire a été envoyé par courrier électronique en mai 2015 à une base d'environ 80 contacts, essentiellement en France, en Suisse et en Belgique. Il a en outre été relayé par l'UPDS et l'UCIE auprès de leurs membres.

Après un paragraphe introductif rappelant le contexte du projet ainsi que l'objet de la sollicitation, les questions suivantes ont été posées :

- Quelles sont selon vous les raisons qui peuvent conduire à des incohérences significatives entre diagnostic et dépollution ? (nombre de données de diagnostic ou de paramètres suivis, zones inaccessibles en dépollution, etc.)
- Quelle est la nature de ces incohérences ? (erreurs de localisation des zones polluées, niveaux de concentration erronés, nature des polluants, etc.)
- Quel en est l'ordre de grandeur ? (sur/sous-estimation de x% en phase travaux)
- Quelles en sont les conséquences ? (budget, délais, litiges...)
- A quelle fréquence êtes-vous confronté à des incohérences que vous qualifieriez de "significatives" en termes d'ampleur ou de conséquences ? (1 cas sur xx ?)
- Seriez-vous prêt à échanger de manière plus détaillée par téléphone sur de tels cas, sous réserve de confidentialité des informations ?
- Quel est votre rôle d'acteur SSP ? (BE, dépollution, institutionnel, donneur d'ordre...)
- Acceptez-vous d'être cité dans les remerciements de l'étude RECORD ? (Oui/Non)

Une analyse qualitative des réponses obtenues est proposée au prochain chapitre. Cette analyse intègre également quelques phrases particulièrement intéressantes recueillies lors du dépouillement des réponses.

3.3. Sélection des cas

Des jeux de données présentant les caractéristiques suivantes ont été sélectionnés :

- Sites diagnostiqués et dépollués,
- Diagnostics réalisés en incluant une étude géostatistique dans un nombre significatif de cas,

- Informations relatives aux volumes de terres (ou masses de polluants) estimés en phase diagnostic et réellement dépollués, ainsi qu'aux conditions d'estimation de ces volumes / masses (méthode d'estimation, contrôles, type et nombre de données),
- Autorisation des propriétaires des sites d'utiliser les informations ci-dessous dans le cadre du projet RECORD après anonymisation des jeux de données.

Les cas d'étude ont été mis à disposition de l'étude par le biais d'échanges entre les contractants et des membres de RECORD, du comité de suivi du projet ou du comité d'experts (voir ci-dessous). Parmi les 25 cas initialement retenus, 2 ont dû être écartés pour impossibilité de comparaison des estimations de diagnostic et des résultats de dépollution.

La liste finale des 23 cas ainsi constituée est fournie au chapitre suivant. Ces cas couvrent les différents types de pollutions chimiques (organiques et inorganiques) rencontrés en France et présentés au § 2.3 (à l'exception des cyanures). Ils proviennent en outre d'activités industrielles très diverses. La majorité des cas concernent des dépollutions s'accompagnant d'une excavation de terres. Quelques-uns d'entre eux ont été retenus pour représenter les situations de dépollution *in situ* des sols et/ou des eaux souterraines, qui requièrent une estimation de la masse de polluants à extraire.

3.4. Méthodologie de description des cas

Chacun des cas a donné lieu à une analyse globale de la situation à partir des rapports transmis par le fournisseur du cas, puis à l'élaboration d'une fiche de synthèse des informations nécessaires à l'étude. Les fiches respectent une grille, élaborée au préalable afin de permettre une analyse systématique des différents cas.

La grille adoptée, reprise ci-dessous, détaille l'ensemble des éléments pertinents collectés en vue de l'évaluation de la qualité des résultats d'estimation obtenus pour le cas.

Tableau 1 : Grille standard d'analyse des cas.

<Site XX - Ancienne activité industrielle – Polluant principal – Type de dépollution >

<Image>

Caractéristiques générales	
Activité(s) à l'origine de la pollution –	
Période(s) et durée(s) d'activité	
Surface du site (parcelle(s))	
Types de substances justifiant une dépollution	
Gammes de concentrations par milieu atteint (sol, eau souterraine, eau surface, air intérieur, sédiments,...)	
Types de terrains atteints par la pollution	
Caractéristiques de la (des) nappe (s) atteinte (s) par la pollution	NS-prof., épaisseur, aquiclude, etc.
Occupation du site et de ses environs	

Etudes et travaux réalisés sur le site pollué	
Date	Phase de l'étude, brève description
Date	Etc...

Caractéristiques de la dépollution	
Type(s) de dépollution	<i>in situ</i> / sur site / hors site avec excavation
Technique(s) de dépollution	
Description détaillée des objectifs fixés à la dépollution	

Estimations des quantités et localisation de la pollution en diagnostic	
Type de méthode d'estimation utilisée	Méthode empirique / Déterministe / Géostatistique / Autre
Méthode précise d'estimation	Si méthode empirique : brève explication Si déterministe : plus proche voisin, inverse des distances, etc... Si géostatistique : krigeage ordinaire, krigeage lognormal, krigeage d'indicateurs, simulations conditionnelles, etc.
Dimension	

Spécificités des données utilisées	Nombre	Nombre de données (sondages/échantillons)
	Types	
	Support	homogène ou pas, hauteur des échantillons, mode de prélèvement (fouille/sondage carotté, etc.),...
	Répartition dans l'espace	homogène, clusters, zones non renseignées, etc...
Données indirectes utilisées dans l'estimation ?	Oui /Non Si oui :	
	Nombre	
	Types	lithologie, infos organoleptiques, mesures sur site XRF, PID, etc....
	Support	
Densité des données utilisées	Lorsque cela est pertinent, discussion des points suivants :	
Détails géostatistiques	Y a-t' il eu transformation /back-transformation des données en distribution gaussienne ?	
	Dégroupement réalisé en cas de clusters ?	
	Vérifier si un changement de support diag-dépol a été modélisé.	
	En cas d'excavation des sols, un facteur de foisonnement des sols a-t' il été appliqué dans l'estimation ?	
	Autre	

Estimations des quantités et localisation de la pollution en dépollution		
Méthode d'estimation utilisée		
Spécificités des données utilisées	Nombre	Nombre de données (sondages/échantillons)
	Types	
	Support	homogène ou pas, hauteur des échantillons, mode de prélèvement (fouille/sondage carotté, etc.),...
	Répartition dans l'espace	homogène, clusters, zones non renseignées, etc...

Comparaison des estimations de diagnostic et résultats de dépollution		
Estimation globale (masses de polluants, volumes ou tonnages de terres par filière, etc...)	Diagnostic	Dépollution
Estimation locale (localisation des zones les plus polluées)	Diagnostic	Dépollution
Appréciation du donneur d'ordre sur ces résultats	Ecart entre estimation/« réalité » considéré comme acceptable ou pas	
Appréciation du bureau d'étude/de la société de dépollution sur ces résultats	Ecart entre estimation/« réalité » considéré comme acceptable ou pas, contraintes de temps/budgets qui ne permettait de réaliser un modèle « correct », etc...	
Impacts des écarts éventuels	Surcoûts, retards, dispositif de traitement sur/sous-dimensionné, etc...	

Avis d'expert sur les raisons des écarts ou similitudes observés entre estimations de diagnostic et résultats de dépollution	
Liste hiérarchisée des éléments pouvant expliquer les écarts ou la similitude des résultats	
Suggestion d'amélioration des estimations (diagnostic/dépollution)	

Références sur le site	
Références pour les sites sans contrainte de confidentialité, publications, etc.	

Autres illustrations

<Autres images éventuelles>

Le vocabulaire spécifique utilisé dans la grille est défini dans le tableau ci-après. Les abréviations utilisées dans les fiches et le reste du texte sont définies dans l'Annexe B.

Tableau 2 : Eléments de vocabulaire utilisés dans les fiches de cas.

Vocabulaire	Définition
Donnée	Concentration en une substance ou groupe de substances, mesurée sur un échantillon (de sol en général).
Donnée indirecte	Donnée renseignant indirectement sur le niveau de pollution de la substance ou du groupe de substances déterminant. Lorsque des données indirectes sont bien corrélées aux données directes, les premières peuvent être utilisées avec les secondes pour améliorer la précision des estimations des zones et volumes pollués. Exemples de données indirectes : concentrations en métaux fournies par les XRF de terrain, mesures de COHV mesurées au PID ² , nature des terrains rencontrés, ou bien encore mesures géophysiques.
Support	Volume et dimension de la portion de sol représentée par la donnée. Une analyse de laboratoire est en effet représentative de la concentration en substance dans l'échantillon de sol, lui-même étant représentatif d'une certaine portion du sol (en place ou dans un lot). La donnée peut être représentative d'une portion très variable selon le mode d'échantillonnage : prélèvement ciblé de quelques cm dans les zones suspectées comme polluées (p.ex. par des valeurs PID élevées, odeur et couleur caractéristiques de la présence de certaines substances), ou bien échantillonnage systématique de composites, représentatifs d'une hauteur de 1 m.

Les 23 fiches de cas ainsi obtenues sont rassemblées dans l'Annexe B du rapport.

3.5. Méthodologie d'analyse des cas

3.5.1. Critères d'évaluation

Une synthèse et une analyse de l'ensemble des informations collectées sur les cas ont ensuite été menées, dans l'objectif d'identifier les principaux facteurs à l'origine des écarts ou cohérences observés entre les estimations de diagnostic et les résultats de dépollution.

Les cas d'étude ont été comparés au moyen des critères décrits ci-après. Une note a été attribuée aux critères pour chacun des cas, sur une échelle pouvant aller de 0 à 3. L'ensemble des notes attribuées aux critères pour les 23 cas d'étude est synthétisée au Tableau 4 (page 26).

Ces critères ont été établis et les notes attribuées dans un souci d'objectivité et de représentativité des différents types de situations rencontrées. La codification de certaines caractéristiques se révèle néanmoins délicate : comment, par exemple, classer la complexité des situations de pollution rencontrées ? On ne peut donc exclure une part d'arbitraire dans les choix des auteurs.

² Détecteur de photo-ionisation.

- Description des situations de pollution au moyen de 6 critères :

N°	Critère
1	Types de substances ou groupes de substances sur lesquels s'appliquent les objectifs de dépollution
2	Superficie de la zone d'intérêt
3	Volume de la zone d'intérêt
4	Profondeur de la zone d'intérêt
5	Mode de dépollution (excavation et/ou <i>in situ</i>)
6	Volume de sol pollué (excavation) ou masse de polluants (<i>in situ</i>) calculés en dépollution

La zone d'intérêt désigne le site dans son entier, ou bien une portion du site spécifiquement touchée par la pollution.

- Critères d'évaluation de la complexité des situations de pollution :

La complexité des situations de pollution, qui rend difficile leur caractérisation du fait de l'hétérogénéité de répartition de la pollution, est mesurée au moyen de 4 critères :

N°	Critère	Note
1	Nombre d'activités différentes (dans le temps et l'espace) ayant siégé sur le site, susceptibles d'avoir généré une contamination du milieu souterrain	0 : mono-activité 1 : multi-activité
2	Nombre de groupes de substances différents induisant une dépollution	0 : 1 type 1 : plusieurs types
3	Nature et nombre de terrains différents atteints par la pollution	0 à 1 selon tableau ci-dessous
4	Niveau de complexité du comportement des substances dans le milieu	0 à 2 selon tableau ci-dessous

Classification des cas selon la complexité des terrains :

Nature et nombre de terrains différents	Note originale	Note revue
1 type de terrain, homogène, p.ex. alluvions sablo-graveleuses	1	0
1 type de terrain, hétérogène, p.ex. remblais	2	0
2 types de terrains, p.ex. remblais / limons argileux	3	0
2 types de terrains, difficiles à dépolluer p.ex. marnes / calcaires	4	1
3 types de terrains, p.ex. remblais / sables fins argileux / niveau marneux	5	1

Après analyse des données, il est apparu que seule une discrimination entre les notes originales de 1 à 3 et de 4 à 5 semblait pertinente ; une notation en 0/1 a ainsi été privilégiée.

Classification des cas selon la complexité du comportement des substances dans le milieu :

Complexité du comportement des substances	Note
Simple : HC C5-C10, BTEX	0
Complexité moyenne : HC C8-C16	1
Très complexe : COHV, HAP, HC C16-C40, bitumes, mélange de type de substances	2

Un **indice de complexité globale** a été construit à partir de la somme des notes obtenues pour chacun de ces 4 critères. L'indice peut prendre, en théorie, des valeurs allant de 0 (situation simple) à 6 (situation très complexe). En pratique, on observe que cet indice prend des valeurs allant de 2 à 6 pour les cas rassemblés. On ne dispose donc pas de cas simples, mais uniquement de cas complexes, de complexité plus ou moins grande.

L'analyse comparative des cas a conduit à finalement retenir un **indice de complexité restreint**, faisant uniquement la somme des notes obtenues par les critères « nombre de groupes de substances » et « nature et nombre de terrains ». Ses valeurs vont de 0 à 2 selon les cas.

Notons que ce critère contient une part importante d'arbitraire et qu'il devra être interprété avec prudence.

- *Critères d'évaluation de l'ancienneté des investigations :*

L'ancienneté des diagnostics et l'étalement dans le temps des phases d'investigation et de dépollution peuvent nuire à la qualité des estimations de quantités à partir des données de diagnostic. Un **indice d'ancienneté** a donc été construit, dont la valeur varie de 0 pour des diagnostics récents (>2010) et courts (étalement dans le temps < 5 ans) à 2 pour des diagnostics anciens (<2010) et longs (étalement dans le temps >5 ans). L'indice est calculé à partir des notes attribuées aux 3 critères suivants :

N°	Critère	Note
1	Nombre de phases d'investigation	1 à 10 pour les 23 cas collectés
2	Durée totale de l'intervention	2 à 16 ans selon les cas
3	Année de fin de dépollution	2006 à 2014 selon les cas

- *Critères d'évaluation des conditions d'investigation en diagnostic :*

Les conditions de caractérisation de la situation de pollution en cours de diagnostic sont appréciées au moyen de 6 critères :

N°	Critère	Note
1	Nombre total de sondages réalisés dans la zone d'intérêt	5 à 1100 sondages
2	Densité de sondages dans la zone d'intérêt (surface en m ² pour 1 sondage)	1 sondage /24 m ² à 1 sondage/1800 m ²
3	Nombre d'échantillons par mètre sur la verticale	1 éch/0.2 m à 1éch/2m
4	Répartition spatiale des données (horizontalement)	0 : maillage régulier 1 : couverture homogène 2 : zones lacunaires et sur-échantillonnées
5	Homogénéité du protocole de prélèvement (support)	0 : homogène 1 : hétérogène
6	Mode de constitution des échantillons sur la verticale	0 : systématique 1 : orienté 2 : combiné

Un **indice de qualité globale des investigations** a été construit sur cette base. Il prend la valeur 0 ou 1. L'indice 1 est obtenu si 4 ou 5 des conditions suivantes sont remplies :

- Les échantillons sont prélevés systématiquement sur la verticale,
- Le protocole d'échantillonnage est homogène,
- Les sondages sont répartis selon un maillage ou couvrent la zone d'intérêt de manière homogène,
- Un minimum de 1 échantillon par mètre a été prélevé sur la verticale,
- La densité de sondages est inférieure à 1 sondage pour 100 m².

L'indice 0 est obtenu si 0 à 3 de ces conditions seulement sont remplies.

- *Critères d'évaluation des conditions d'estimation des volumes (ou masses) en diagnostic :*

Les conditions d'estimation des volumes de matériaux à dépolluer (ou de masses de polluants en place pour un traitement *in situ*) sont évaluées au moyen de 2 critères :

N°	Critère	Note
1	Méthode d'estimation utilisée	1 : méthode empirique seule 2 : complétée par une méthode déterministe 3 : complétée par une méthode géostatistique
2	Conditions de mises en œuvre de la géostatistique	0 : Incorrectes 1 : Correctes

Il est à noter que la note attribuée aux méthodes d'estimation ne porte pas de jugement de valeur sur celles-ci, mais est simplement destinée à différencier les cas selon les méthodes employées, lors de leur analyse comparative. En outre, toute estimation de volumes/masses met en œuvre a minima un jugement d'expert, qui peut selon les cas être complété par une approche déterministe ou géostatistique.

La mise en œuvre de la géostatistique est considérée comme incorrecte lorsqu'une erreur méthodologique a pu être identifiée, telle que : application de seuils à une carte obtenue par krigeage pour estimer des volumes (le krigeage lissant par construction la variabilité du phénomène), absence de prise en compte de l'effet de support dans l'estimation de volume de terres à excaver, estimation de volumes à partir de cartes de probabilités de dépassement de seuils, etc.

- *Critères d'évaluation des conditions de calcul des volumes (ou masses) en dépollution (fiabilité du résultat de dépollution)*

Les volumes de terres excavées ou les masses de polluants extraits calculés en phase de dépollution constituent la référence à laquelle sont comparées les estimations de quantités menées en fin de diagnostic. Les conditions de calcul des quantités en phase de dépollution varient néanmoins d'un cas à l'autre, de sorte que la fiabilité de la « référence » peut s'avérer plus ou moins grande.

La fiabilité de la référence des 23 cas est évaluée en analysant le type et le nombre de contrôles effectués en dépollution (Le cas des dépollutions *in situ* a été traité séparément) :

N°	Contrôle
1	Echantillonnage et analyses de contrôle en fond et parois de fouilles
2	Echantillonnage et analyses de contrôle à l'intérieur de la zone polluée
3	Echantillonnage et analyses en dehors de la zone polluée
4	Absence d'identification d'une pollution résiduelle en fin de dépollution
5	Le cas échéant, estimation des quantités résiduelles

Un **indice de fiabilité du calcul de dépollution** a été construit à partir de ces critères. Il prend la valeur 1 lorsqu'au moins 3 de ces types de contrôles ont été effectués, la valeur 0 si moins de 2 de ces contrôles ont été réalisés.

Notons que les estimations effectuées en dépollution peuvent être soumises à d'autres sources d'incertitudes que celles liées au type et au nombre de contrôles effectués. Le mode de constitution des échantillons, les méthodes analytiques, les méthodes d'estimation sont autant de sources d'incertitudes qu'il conviendrait de prendre en compte, comme cela est réalisé pour les estimations de diagnostic. Des informations précises à ce sujet sont néanmoins rarement disponibles.

- *Critères de comparaison des estimations de diagnostic et des calculs de dépollution :*

Les critères utilisés pour comparer les estimations de diagnostic et les calculs menés en fin de dépollution sont au nombre de 2 :

N°	Critère
1	Erreur d'estimation : différence entre le volume de terres à dépolluer estimé en diagnostic et le volume calculé en dépollution
2	Erreur d'estimation relative : différence entre le volume de terres à dépolluer estimé en diagnostic et le volume calculé en dépollution, rapportée au volume calculé en dépollution

Les erreurs sont fournies en valeurs absolues (pas de différenciation des situations de sous- ou surestimation).

3.5.2. Analyse statistique, interprétation et recommandations

L'influence des facteurs potentiels d'écarts entre estimations de diagnostic et résultats de dépollution a été analysée à l'aide de calculs statistiques simples sur les critères de classification. Pour chacun des indices décrits ci-dessus, pour chacune des valeurs prises par l'indice, ont été calculés :

- les moyennes des erreurs d'estimations relatives,
- les écarts-types des erreurs d'estimations relatives,
- les nombres de cas concernés.

Ces calculs ont été réalisés sur l'ensemble des cas, ou bien en écartant les cas de dépollution *in situ*, ou bien en écartant les cas où la fiabilité du calcul de dépollution est jugée médiocre (indice de fiabilité égal à 0).

Les moyennes et écarts-types des erreurs ont également été calculés conditionnellement à 2 facteurs (p.ex. qualité des investigations et complexité de la situation de pollution), pour étudier leur interdépendance.

Enfin une analyse multivariable (analyse en composantes principales) a été menée à partir des différents indices et des erreurs d'estimation relatives, mais sans fournir d'éléments d'interprétation supplémentaire sur les facteurs à l'origine des écarts entre diagnostic et dépollution (résultats non présentés dans le rapport).

L'ensemble des résultats statistiques obtenus est ensuite interprété. Plusieurs recommandations opérationnelles en découlent. En outre, les cas les plus pertinents en termes de caractérisation sont discutés, à titre illustratif.

3.6. Evaluation par un comité d'experts externes

L'ensemble des résultats a été transmis pour validation à la fois au comité de suivi et au comité d'experts externes décrit dans le tableau ci-dessous. Ce comité est constitué de responsables techniques travaillant au sein de bureaux d'études, de société de dépollution ou d'organismes institutionnels.

Le séminaire d'une demi-journée, organisé le 17 septembre 2015 à Lyon, était destiné à confronter les opinions suscitées par la présentation des cas.

Tableau 3 : Membres du comité d'experts.

Nom	Société	Poste/Service
Stéphane Belbèze	ANTEA GROUP	Directeur de Projet – Direction Technique
Aurélie Blusseau	ARCADIS	Ingénieur confirmé SSP
Véronique Croze	ICF ENVIRONNEMENT	Directeur technique et d'innovation
Michel Garcia	KIDOVA	Gérant
Jean-Marie Côme	BURGEAP	Directeur du Dépt R&D
Laurent Rouvreau	BRGM	Responsable de l'Unité SSP

4. Présentation des résultats

4.1. Questionnaire qualitatif

17 personnes ont répondu au questionnaire qualitatif, destiné à recueillir la perception des acteurs des sites et pollués par rapport à la question de la cohérence entre diagnostics et travaux de dépollution. Parmi ces répondants, 10 proviennent de bureaux d'études, 6 de sociétés de dépollution tandis qu'un répondant intervient notamment en tant qu'expert de justice et un autre en tant qu'autorité. Un des répondants intervient à la fois en tant que bureau d'études et société de travaux.

Les paragraphes ci-dessous synthétisent les réponses obtenues, tout en reprenant sous forme d'encadrés certains extraits de réponse au questionnaire. Les réponses sont listées par ordre décroissant de fréquence, sans que cet ordre corresponde à une hiérarchisation établie par l'équipe de projet Geovariances – eOde. Le nombre limité de répondants doit en outre inciter à la prudence lors de l'interprétation des pourcentages repris dans les tableaux des pages suivantes.

4.1.1. Raisons ayant pu conduire à des incohérences significatives

Le tableau ci-dessous reprend les principales raisons avancées par les répondants comme étant à l'origine d'incohérences entre diagnostic et dépollution.

Raison conduisant à des incohérences	Réponses
Nombre insuffisant de données (sondages, analyses)	16 94%
Problèmes d'échantillonnage (biais, polluants oubliés, packs incomplets...)	9 53%
Inaccessibilité de certaines zones	6 35%
Hétérogénéité de la pollution et/ou du terrain	5 29%
Mauvaise appréciation de l'origine ou du comportement des polluants dans les sols	4 24%
Précipitation à passer en phase travaux	3 18%
Manque de compétences des acteurs impliqués	3 18%
Mauvaise prise en compte des conditions de dépollution	1 6%
Pollution a posteriori d'une zone déjà dépolluée par une source à proximité	1 6%

Logiquement, la quantité de données disponibles est citée quasiment par l'ensemble des répondants, suivie de l'importance de la qualité des données. De nombreux problèmes d'échantillonnage et de saisie/report d'analyses sont avancés par les répondants. Certains problèmes découlent notamment d'une prise en compte insuffisante des besoins pour le dimensionnement des travaux de dépollution.

Finalement, l'hétérogénéité de la pollution et/ou du terrain est plusieurs fois mentionnée comme source d'incohérence, tout comme la mauvaise appréciation de l'origine ou du comportement des polluants.

Éléments mentionnés par les répondants :

- Incohérences entre diagnostics et travaux :
 - *Des packs analytiques insuffisants ne permettant pas toujours de valider de manière certaine les filières de traitement, ce qui reporte le risque sur les entreprises de travaux.*
 - *Imprécision dans les diagnostics, notamment concernant les coupes des sondages dont l'importance est souvent sous-estimée ; exemples : une couche de remblais qui va étonnamment très précisément de 0 à 1 m, l'absence de détail des couches rencontrées « remblais », l'oubli de préciser la présence d'eau, l'absence de mesures in situ pour détecter des volatils, des sondages à la tarière pour des recherches de COHV...*
 - *Echantillonnage inadapté par rapport aux travaux (COHV, PCB...).*
 - *Echantillons moyens prélevés parfois sur des couches de 2 m d'épaisseur voir plus !!! Constitution d'échantillons composites mélangeant différentes lithologies, voire différents sondages (même pas dans une même maille).*

Éléments mentionnés par les répondants (suite) :

- *Souhaits du MO mal explicités ou compris => un diagnostic avant plan de gestion est réalisé dans le but de dimensionner les travaux. Souvent (par manque de temps, d'argent ou car le projet futur n'est pas connu), les diagnostics « de screening » ou de compréhension sont utilisés aux fins de définir la dépollution ... et il manque souvent les éléments pertinents ! Cela induit souvent l'absence d'une phase de sélection et de dimensionnement précis de la méthode de dépollution et des objectifs.*
- Insuffisance du diagnostic :
 - *Nos clients n'ont pas toujours le budget et/ou le délai nécessaire pour établir des Diagnostics "approfondis".*
- Erreurs de saisie :
 - *Identification des échantillons, décalage de lignes dans les tableaux (car d'un labo à l'autre les composés d'une même famille ne sont pas listés dans le même ordre), erreurs d'analyses en labo, entre labos, mélange entre LD et LQ, erreurs sur les plans ou de report des sondages...*

4.1.2. Nature des incohérences entre diagnostic et dépollution

La délimitation erronée de l'emprise de la zone polluée est la principale incohérence constatée. Ici encore, plusieurs témoignages soulignent l'existence d'incohérence entre les phases diagnostic et de travaux, pouvant conduire à des découvertes en phase travaux ou à une mauvaise appréciation de la nature des polluants. L'estimation d'une masse de polluants à traiter requiert en outre une bonne quantification des niveaux de concentration en polluants présents sur le site ; plusieurs répondants identifient comme nature d'incohérences des erreurs d'appréciation de ces niveaux. Notons que ces erreurs peuvent également découler d'un contrôle inadapté en cours de dépollution.

Nature des incohérences	Nombre	
Erreur sur l'extension de la pollution (H/V)	12	71%
Niveaux de concentration erronés	8	47%
Mauvaise appréciation de la nature des polluants	6	35%
Contrôles inadaptés en cours de dépollution	3	18%
Découverte de nouvelles zones polluées	1	6%
Non détection de déchets et surtout de mâchefers	1	6%
Objectifs de dépollution inconnus / mal appréciés	1	6%

Éléments mentionnés par les répondants :

- Attitude du BE :
 - *Pour sécuriser le client dans le cadre de négociations pour l'achat du terrain, le bureau d'études peut être amené à prendre des hypothèses relativement maximalistes sur l'extension des pollutions, ce qui amène à une surestimation des volumes par rapport à ceux gérés en phase chantier.*
- Incohérences entre diagnostics et travaux :
 - *Pour les métaux, prendre en compte l'élément total plutôt que la fraction disponible / soluble ..., pour les mélanges organiques, somme des fractions lourdes / légères... alors que la méthode de dépollution devra être définie pour traiter une certaine partie de la pollution. Il arrive aussi que la présence d'un paramètre (non identifié au diagnostic) remette en cause le traitement envisagé (amiante dans les sols par ex.).*
- En cours de travaux
 - *Lors d'excavations, les zones les plus polluées sont souvent excavées en premier puis on élargit la fosse. Cette approche permet souvent de limiter les volumes d'excavation et donc biaise l'estimation initiale qui ne tient pas compte de la procédure d'excavation.*

Éléments mentionnés par les répondants (suite) :

- En cours de travaux
 - *Il est difficile de réceptionner sur la matrice sol (polluants distribués de manière hétérogène le plus souvent)... lorsque cela est possible la réception se fait sur une matrice globalisante (gaz des sols pour les venting par ex., nappe pour les méthodes par barrière hydraulique ou réactive) mais il serait peut-être plus opportun d'intégrer aussi un aspect bilan massique ou volumique sur les objectifs (quel % d'abattement du volume ou de la masse totale plutôt que de la concentration en quelques points).*
 - *S'il s'agit d'estimer la masse de polluants en place (et non plus simplement le volume ou la masse de sols pollués), une mauvaise estimation des teneurs ou de la masse volumique des sols peut entraîner des erreurs importantes. Plus généralement, il est toujours plus facile (ou plus précis) d'estimer des volumes de sols pollués, pour lesquels il s'agit de déterminer "simplement" si les teneurs sont supérieures ou inférieures à des seuils, que d'estimer des masses de polluant en place qui nécessitent d'estimer précisément les teneurs.*

4.1.3. Ordre de grandeur des écarts de volumes/masses

Il ressort des questionnaires que l'on peut légitimement distinguer deux types d'écart entre estimation en phase diagnostic et réalité de la dépollution :

- Des écarts usuels et considérés comme « acceptables » par les répondants, de 10 à 25-30% et en moyenne 20% ;
- Des écarts élevés, jugés significatifs, allant de 50 à 100% ; trois répondants vont même jusqu'à mentionner des écarts de 180, 300 voire 1000%, qui correspondent vraisemblablement à des cas réellement « pathologiques ».

Ces ordres de grandeur pourront être comparés à ceux obtenus lors du retour d'expérience sur les 23 cas présentés au § 4.2.

Éléments mentionnés par les répondants :

- Qualité des diagnostics et écarts auxquels il est raisonnable de s'attendre :
 - *Bon nombre de projets de dépollution se passent bien, avec maîtrise des coûts et du planning.*
 - *Il semblerait que les pratiques se soient améliorées depuis quelques années, notamment grâce à la collecte d'un nombre plus important de données et grâce à une précaution accrue par rapport aux différentes raisons pouvant conduire à des biais d'échantillonnage.*
 - *Globalement peu de différences d'estimations des coûts entre une phase projet et le coût final des travaux si et seulement si les investigations de dimensionnement ont été faites correctement. Les problèmes surviennent quand le maître d'ouvrage provisionne sur la base d'un bilan coût-avantage qui est une estimation de coût ne prenant pas en compte tous les frais annexes et donc n'est même pas d'un niveau avant-projet.*
 - *Il faut systématiquement avertir le client qu'une définition à 10% près relève de la chance plutôt que de la science.*
 - *La plupart du temps, on essaie de rester dans l'enveloppe initiale quitte à faire des calculs de risques résiduels sur le résiduel non traité.*
- Comparabilité diagnostic/dépollution :
 - *La difficulté réside souvent dans le fait qu'on ne peut pas toujours comparer l'estimation avant travaux et le coût final après travaux car tout n'est pas lié à un problème de diagnostic (les possibilités de réemploi, ou bien les volumes eux-mêmes de terrassement du projet (et non juste des zones polluées) peuvent en effet avoir également été mal estimés).*
 - *Les écarts sont bien notés en cas d'excavation, car on compare les volumes de terres avant /après. Lors des travaux in situ les écarts sont moins visibles car ils se confondent avec d'autres paramètres de la dépollution. D'une part on dispose rarement d'un bilan matière avant/après, d'autre part les dépassements sont souvent sur le temps de traitement qui lui dépend de la masse à sortir, de la perméabilité moyenne du site et des équipements que l'on a mis en place.*

Il faut noter que plusieurs répondants soulignent à juste titre la qualité d'un bon nombre de dossiers de dépollution, ainsi qu'une amélioration notable des pratiques ; un répondant attribue cette

amélioration à une caractérisation plus complète des sites (plus grand nombre de données) et à une meilleure maîtrise des conditions d'échantillonnage.

Finalement, un répondant soulève fort à propos la difficulté accrue de réconcilier des masses de polluants prévues/dépolluées lors de traitements *in situ*.

4.1.4. Fréquence des cas conduisant à des écarts significatifs

La fréquence d'écarts significatifs varie de 1 cas sur 2 à 1 cas sur 10 (1 répondant mentionnant néanmoins 1 cas sur 100).

On peut estimer qu'en moyenne des écarts significatifs (supérieurs à 25-30% environ) sont observés dans approximativement 25% des cas.

4.1.5. Conséquences relatives à ces écarts

Les conséquences d'écarts significatifs entre volumes de terres polluées prévus (ou masses de polluants) et volumes dépollués sont essentiellement de trois ordres, cités de manière relativement équilibrée : conséquences financières, délais et litiges. L'ampleur des conséquences va souvent de pair avec l'ampleur du projet lui-même. Notons que la notion de « litige » est ambiguë et a pu être interprétée de différentes manières par les répondants, allant du problème avec un client à des conséquences judiciaires (plainte, tribunal). La fréquence de ces « litiges » doit donc être interprétée avec prudence.

Il est en outre intéressant de relever que ces conséquences sont génératrices de problèmes entre le donneur d'ordre et l'entreprise de travaux, le bureau d'étude n'étant en général plus impliqué sur le projet à ce stade.

Conséquence	Réponses
Coût	53%
Délai	47%
Litige	35%

Autres conséquences mentionnées :

- Remise en cause de la faisabilité du projet
- Insatisfaction du MOA ou de l'entreprise de dépollution / BE,
- Déficit de crédibilité du BE
- Stress

Eléments mentionnés par les répondants :

- Biais en fonction du type de contrat et un effet d'échelle : plus le chantier est gros, plus les conséquences d'un écart prennent des proportions conséquentes :
 - *Budget qui gonfle, mais que nous maîtrisons, puisque dans cette hypothèse, nous mettons en place un cahier des charges qui prend en compte cette possible variabilité...*
 - *Délai qui augmente bien sûr, sauf lorsque le chantier est suffisamment vaste pour mettre en place un deuxième atelier... tout dépend également de l'échéancier indiqué dans le CCTP travaux, et ce que l'on y indique comme contrainte... Gérer l'imprévu quand on se doute qu'il va arriver, c'est prédisposer le Client face à la part non maîtrisable de son dossier...*
 - *Litiges... Ça ne nous est pas arrivé. Nous n'hésitons pas dans nos rapports à nous engager fortement sur ce que nous considérons comme convenablement délimité... lorsque nous n'avons pas "les billes" pour bien faire ce travail ou alors parce que ce n'est pas possible de bien le faire, nous n'hésitons pas à quantifier l'incertitude et à l'exprimer sous la forme d'une fourchette budgétaire... Le premier besoin du Client est de maîtriser son budget. Les outils existent tous pour cela. Tenez par exemple, le dernier CCTP rédigé intègre "Des volumes de sols dits certains", des volumes de sols dit "incertains"... Il s'agit de dépolluer les sols au pourtour et au droit d'une vaste fosse de rétention... nous avons investigué tout le tour de l'ouvrage en réalisant des sondages à raison de 1 par maille de 15m X 15m... La fosse fait 4m de profondeur n'est pas accessible au moment de la campagne de sondages... Par rapport aux mailles qui l'entourent, nous avons deux possibilités... des mailles qui indiquent une gestion hors site de la matrice polluée et d'un autre côté, des mailles qui indiquent le contraire... Deux extrapolations sont possibles... Sur le cahier des charges, nous avons sécurisé le marché, aussi bien vis-à-vis du Client que de l'Entrepreneur... C'est de plus en plus et vraiment notre façon de fonctionner... Le service achat du Client s'y retrouve, l'entreprise répond avec un prix au plus proche de la réalité, ne s'estiment pas obligé de "bétonner" son offre car elle se sent en sécurité pour répondre...*

Éléments mentionnés par les répondants (suite) :

- Budget
 - *Prix au bordereau => le prix est fixé pour une prestation unitaire. si dépassement, le client doit trouver le budget manquant pour poursuivre.*
 - *Prix au forfait => le prix est fixé pour la prestation dans sa globalité avec une tolérance +/- x%. L'entreprise qui réalise le chantier prend des risques en cas de dérive. s'il y a dépassement conséquent, il a litige/négociation qui peut engendrer des désaccords.*
 - *Moyen technique et humain : location machine, logistique, disponibilité personnel, sous-traitance...*
 - *Les marchés de dépollution ont tendance à être signés sur la base d'un forfait quantitatif et financier légèrement surestimé d'un point de vue quantitatif afin de compenser la baisse des prix unitaires. Les entreprises réalisent alors une campagne complémentaire de sondages avant le démarrage des travaux et affinent les estimations.*
- Délais :
 - *Dépassement / impossibilité de respect, avec des conséquences potentiellement multiples : annulation/report de la vente ou du futur projet.*
 - *Quasiment toujours car avenants à négocier, allers retours client - BE – Société travaux*
- Litiges :
 - *Ce sont des sources de tension entre le client et le dépollueur ; le BE n'est jamais impliqué. Les conséquences portent sur la gestion contractuelle, l'allongement des délais et le dépassement des budgets, avec en point d'orgue « qui paye ? ».*
 - *Absence de paiement, paiement revu à la baisse, délais de paiement, pénalité, arrêt de chantier.*
 - *Cas extrême des conséquences peut aboutir à la procédure judiciaire.*
 - *Les litiges viennent de plus en plus souvent devant les tribunaux mais les conflits sont ensuite réglés à l'amiable dans 80% des cas, sur la base du rapport de l'expert qui indique les responsabilités des uns et des autres : pas de budget suffisant par le maître d'ouvrage, défaut de conseil par le bureau d'étude, engagement de dépollution pour des sommes forfaitaires et globales, etc.*
 - *Les litiges dépendent des clients, car certains savent et acceptent les incertitudes des diagnostics.*
- Autres conséquences :
 - *Image de la société.*

4.2. Description synthétique des cas

L'analyse porte sur **23 cas d'étude**. Certains d'entre eux ont donné lieu à plusieurs calculs des quantités en phase de diagnostic, par différentes méthodes d'estimation. D'autres ont subi plusieurs dépollutions, du fait de la présence de plusieurs types de substances, et par conséquent plusieurs estimations de quantités (volumes ou masses). Au bilan, il est possible de mener **28 comparaisons** entre estimations de diagnostic et calculs de dépollution.

Le Tableau 4 liste les cas recensés ainsi que leurs principales caractéristiques.

La **surface des zones d'intérêt** est, **en moyenne, égale à 23 000 m²**, et varie de 800 m² à 115 000 m².

Les polluants suscitant un besoin de dépollution sont exclusivement des **hydrocarbures pétroliers** (HC) pour 8 cas d'étude, exclusivement des **COHV** pour 3 sites, exclusivement des **HAP** pour 2 sites et un **mélange de substances organiques et inorganiques** pour 9 cas (39%).

La dépollution s'est accompagnée d'une **excavation des terres pour 19 cas (83%)**, d'un traitement *in situ* pour 4 cas (17%). Ces proportions sont proches de celles estimées sur l'ensemble de l'Union Européenne (§ 2.3, 75% d'excavations, 25% de traitements *in situ*). Deux sites ont donné lieu à la fois à une excavation et un traitement *in situ*. Un cas concerne un traitement de nappe *in situ*.

Pour les sites traités par excavation, **le volume dépollué (calculé en dépollution) est en moyenne égal à 16 823 m³**, et varie de 333 à 80 370 m³. Pour les sites traités *in situ*, **la masse de polluants extraite (calculée en dépollution) est en moyenne égale à 1 292 kg**, et varie de 140 à 3 000 kg.

Les estimations des quantités de terres ou masses de polluants ont été menées dans 13 situations sur base exclusive d'une **méthode empirique (46%)**. Ce jugement a été complété dans 5 situations par des **méthodes déterministes (18%)** et dans 10 cas par une **approche géostatistique (36%)**. La proportion de sites traités avec des méthodes géostatistiques est plus importante que celle qui pourrait être trouvée sur l'ensemble des cas traités en France (chiffres non disponibles dans la littérature consultée), puisque l'accent a été mis sur ces méthodes dans la présente étude.

DESCRIPTION SYNTHETIQUE DES CAS

- 23 jeux de données industrielles
- 28 comparaisons possibles diagnostic-dépollution
- 83% de dépollutions par excavation
- Estimations à 46% par méthode empirique, 36% par géostatistique, 18% par interpolation déterministe
- Grande variété des situations de pollution :
 - Surfaces de 23 000 m² en moyenne, allant de 800 à 115 000 m²
 - Pollutions par hydrocarbures, organohalogénés volatils, HAP ou mélanges de substances
 - Volumes dépollués de 17 000 m³ en moyenne, allant de 300 à 80 000 m³
 - Masses extraites de 1 300 kg en moyenne, allant de 140 à 3 000 kg
- Situations peu à très complexes (pas de cas simples à un seul polluant dans un sol homogène)

L'erreur d'estimation relative est notre principal critère de comparaison entre volumes (ou masses) diagnostiqués et dépollués. Cette erreur correspond à la valeur absolue de l'écart entre l'estimation de diagnostic et le calcul de dépollution, normalisé par le calcul de dépollution qui est pris comme référence. Bien entendu, le volume dépollué comme la masse de polluants calculée après traitement *in situ* restent tous deux entachés d'erreurs et d'incertitudes. Pour autant, étant évalué à partir d'informations plus nombreuses, ce volume se rapproche vraisemblablement plus de la réalité du terrain que celui estimé en phase diagnostic. La fiabilité de l'estimation faite en dépollution sera néanmoins appréciée et prise en compte dans notre analyse des écarts.

L'erreur d'estimation relative est égale, en moyenne, à 26%, sur les 28 situations de comparaison possibles. **L'erreur varie entre 1% et 84%**. Un cas particulier présente une erreur extrême, égale à 436%, dont il n'a pas été tenu compte dans les statistiques (cas F basé uniquement sur 5 sondages initiaux). Il s'agit d'un cas « pathologique », non représentatif des situations classiquement rencontrées par les acteurs de la dépollution. L'origine de cet écart extrême est clairement liée à un manque de données pour estimer la masse de polluants à traiter *in situ*.

Par rapport au questionnaire, nous constatons que les cas se répartissent relativement bien entre d'une part des cas pour lesquels des erreurs usuelles/acceptables sont observés et, d'autre part, un certain nombre de cas présentant des niveaux d'écarts jugés significatifs ; à titre d'exemple, plus du tiers des situations a fait l'objet d'écarts supérieurs à 30%. Ce pourcentage de cas est légèrement plus élevé que ce qui ressort du questionnaire, mais reste néanmoins proche et cohérent.

L'estimation de diagnostic a sous-estimé la quantité à extraire en dépollution dans 16 situations (57%), surestimé dans les 12 autres (43%). Cela signifie que les erreurs de prédiction conduisent plus fréquemment lors de la dépollution à de mauvaises surprises et des pollutions imprévues ou sous-estimées.

ERREURS RELATIVES D'ESTIMATION

- Définition : valeur absolue de la différence entre quantités (volumes, masses) estimées au stade diagnostic et quantités calculées en fin de dépollution, normalisé par le calcul de dépollution (pris comme référence)
- Erreurs de 26% en moyenne, 1% au minimum, 84% au maximum
- 57% de sous-estimations, 43% de sur-estimations

Tableau 4 : Tableau de synthèse des cas : indices de classification et erreurs d'estimation relatives.

Cas	Type de polluants	Dépollution	Superficie (m2)	Vol pollué (m3) ou Masse polluant (kg)	Fiabilité (ou in situ)	Qualité Echant	Méthodo	Géostat ok	Complexité site	Ancienneté	Erreur relative (%)
A	COHV	In situ	800	736 kg	1	3	3	1	1	1	2%
B	HC	Exca	73000	36000 m ³	1	1	2		0	0	1%
C_expert	COHV	In situ	73000	3000 kg	1	2	1		0	0	24%
C_gst_krig					1	2	3	0	0	0	13%
C_gst_simu					1	2	3	1	0	0	2%
D_expert	HAP, BAP, Nap	Exca	16400	4609 m ³	0	0	1		0	1	30%
D_gst					0	0	3	1	0	1	3%
E	HC, HAP	Exca	20000	32920 m ³	1	2	2		1	0	32%
F	COHV	In situ	1600	140 kg		3	1		1	1	7%
G-dét	HC	Exca	46600	13171 m ³	1	2	1		0	2	37%
G-gst					1	2	3	0	0	2	30%
G-gst+support					1	2	3	1	0	2	8%
H	HAP, BAP, Nap	Exca	6200	9518 t	0	3	3	1	0	1	19%
I	HC, HAP, BTEX	Exca	36000	28537 m ³	1	0	2		1	2	25%
J	HC	In situ	1000	333 m ³	1	1	3	0	0	1	76%

K	HC, COHV, HAP, BTEX, PCB	Exca	25000	19840 m ³	1	1	2	1	0	84%	
L	Métaux, Chlorobenzènes, COHV	Exca	14781	73000 m ³	0	0	2	1	2	5%	
M	HC, HAP, COHV, BTEX, Métaux	Exca	115000	13555 m ³		1	3	1	1	2	26%
N	HC, Métaux	Exca	15600	80370 m ³	0	1	1	1		26%	
O	HC	Exca	2500	3743 m ³	0	0	1	0	1	17%	
P	HC	Exca	33000	2335 m ³	0		1	1	1	27%	
Q	HC	Exca	4971	1504 m ³	0	0	1	0	0	5%	
R	HC, HAP, BTEX	Exca	1122	789 m ³	0	1	1	1	0	1%	
S	HC, BTEX (benzène)	Exca	9000	3600 m ³		0	1	1	1	42%	
T	HC, HAP sous forme de bitumes et fûts	Exca	2205	4935 m ³	1	0	1	1	1	39%	
U	HC, HAP sous forme de bitumes	Exca	20000	853 m ³		0	1	1	2	72%	
V	HC sous forme de bitumes	Exca	4690	4200 t		2	1	0	1	27%	
W	HC sous forme de bitumes et fûts	Exca	8900	8293 m ³	0	1	3	0	1	0	54%

Le Tableau 5 reprend aux pages suivantes les commentaires des donneurs d'ordre et/ou des bureaux d'étude relatifs aux niveaux d'erreurs observés, ainsi que quelques commentaires issus de l'équipe de projet. Ces informations sont extraites des fiches fournies dans l'Annexe B.

On note déjà ici que de faibles écarts ne se retrouvent pas systématiquement associés à de bonnes conditions d'échantillonnage. Ainsi, en dépit d'un nombre de données insuffisant, seulement 5% d'erreurs ont été constatés sur le cas L qui correspond à une situation de moindre complexité. A l'opposé, plusieurs cas présentant des écarts significatifs ont fait l'objet de diagnostics clairement insuffisants. On peut également relever l'utilisation de méthodes géostatistiques inappropriées sur certains cas, à l'origine d'écarts significatifs (cas J et W par exemple).

Tableau 5 : Tableau de synthèse des cas classés par erreur d'estimation relatives croissantes : commentaires des donneurs d'ordre et bureaux d'étude et recommandations de l'équipe de projet.

Cas	Erreur relative (%)	Commentaires DO et BE	Commentaires / Recommandations équipe projet
R	1%	B.E. : Ecart acceptable (~1%)	<ul style="list-style-type: none"> La faible erreur d'estimation calculée est à modérer, compte-tenu du résultat de dépollution jugé peu fiable (pas de contrôles des sols à l'intérieur et à l'extérieur des zones d'intérêt). Certaines conditions d'investigation sont favorables : densité de 1 sondage pour 56 m², de 1 échantillon pour 20 cm sur la verticale (autres conditions inconnues).
B	1%	D.O. : Très content de l'opération globale. B.E. : Cas modèle, pas de retard !	<ul style="list-style-type: none"> L'essentiel des critères favorables à la réduction des écarts sont remplis Facteur de réussite : interpolation combinée à interprétation minutieuse de la répartition de la pollution La géostatistique aurait permis de quantifier l'incertitude d'estimation

Cas	Erreur relative (%)	Commentaires DO et BE	Commentaires / Recommandations équipe projet
C_gst simu	2%	B.E. : Comparaison de différentes méthodes d'estimation --> toutes les méthodes déterministes estiment des masses de polluants inférieures à celles fournies par une démarche géostatistique. La démarche géostatistique par simulations fournit une estimation de la masse plus proche de la « réalité ».	<ul style="list-style-type: none"> • De nombreux critères favorables à la réduction des écarts sont remplis • Augmenter la densité d'échantillonnage sur la verticale • Avantage de la géostatistique appliquée correctement par rapport aux autres méthodes
A	2%		<ul style="list-style-type: none"> • La totalité des critères favorables à la réduction des écarts sont remplis • Eventuellement recouvrement homogène de la zone
D	3%	D.O. : bilan mitigé, raison principale : difficultés liées aux données ont incité les géostatisticiens à appliquer des techniques sophistiquées, qui ont "perdu" les interlocuteurs dans des détails. B.E. : Nombreuses difficultés de modélisation liées à la qualité des données (support, localisation des zones dépolluées, identification des structures enterrées, etc...), et à l'hétérogénéité à petite distance de la pollution aux HAP.	<ul style="list-style-type: none"> • Augmenter la fiabilité des résultats de dépollution par des contrôles analytiques à l'intérieur des zones • Diagnostic : augmenter la densité de sondages, assurer un recouvrement homogène de la zone et un protocole de prélèvement homogène, et systématique sur la verticale • Compléter le jugement d'expert par une méthode d'interpolation
Q	5%	B.E. : Ecart acceptable (~5%)	<ul style="list-style-type: none"> • La faible erreur d'estimation calculée est à modérer, compte-tenu du résultat de dépollution jugé peu fiable (pas de contrôles des sols à l'intérieur et à l'extérieur des zones d'intérêt). • Conditions d'investigation perfectibles : densité de 1 sondages pour 146 m² à augmenter, recouvrement de la zone par les sondages à assurer par un maillage régulier ou systématique aléatoire. • Compléter le jugement d'expert par une méthode d'interpolation.
L	5%	D.O. : Ecart considéré comme acceptable. B.E. : La couleur et texture des sols pollués du chantier fait qu'il est possible de trier les sols à l'avancement. Une maille rouge peut être subdivisée en 2 ou 3 sous-ensembles dont du propre.	<ul style="list-style-type: none"> • Faible nombre de données utilisées par rapport à toutes les campagnes disponibles. • Recommandations : Plus de sondages selon un maillage carré sans quoi rien n'est possible. Sensibilisation du client à l'incertitude des chantiers et à la relation entre qualité du diagnostic et fiabilité des prédictions, évitant les mauvaises surprises en phase chantier. • Compléter le jugement d'expert par une méthode d'interpolation.
F-complet	7%	D.O. : Satisfaction amélioration de la qualité des eaux souterraines B.E. : Objectifs validés.	<ul style="list-style-type: none"> • Faible échantillonnage au stade du diagnostic initial, affiné ensuite. • Nature de la contamination
G-gst+support	8%	Sous-estimation non négligeable de l'estimation déterministe ainsi que du modèle géostatistique sans prise en compte de l'effet de support.	<ul style="list-style-type: none"> • Sous-estimation de la modélisation déterministe, qui ne comptabilise en volume pollué que les hauteurs de prélèvement analysées et supérieures au seuil de dépollution. • La prise en compte de l'effet de support lors de la modélisation géostatistique a permis de fournir une estimation réaliste des volumes contaminés, assortie d'une quantification de l'incertitude.
O	17%	D.O. : Incohérence entre les conditions de prélèvement en phase diagnostic et lors des contrôles en flanc/fond de fouille. L'entreprise de travaux a commencé par la partie la moins polluée. Le suivi du donneur d'ordre n'a pas été suffisamment vigilant.	<ul style="list-style-type: none"> • Erreur d'estimation relativement acceptable pour ce cas relativement peu complexe, mais dont les investigations sont perfectibles: recouvrir la zone de manière homogène par un maillage régulier ou systématique aléatoire, homogénéiser le protocole de prélèvement. • Rare cas où les indices organoleptiques ont été utilisés pour estimer les volumes. • Ecart lié à l'intégration de contraintes techniques lors de la dépollution, limitant localement cette dernière. • Problèmes de contrôle en flancs/fond de fouille.

Cas	Erreur relative (%)	Commentaires DO et BE	Commentaires / Recommandations équipe projet
H	19%	Tonnage global bien estimé, inversion de répartition des tonnages entre les deux CET, volume incinéré double de la prédiction. Pas de surcoût vu que les écarts de classification ont joué dans le bon sens (plus de volumes dans les filières moins coûteuses).	<ul style="list-style-type: none"> La prise en compte de l'effet de support dans la méthode géostatistique n'a pas amélioré les résultats. Les écarts observés sont probablement liés au protocole d'excavation adaptatif utilisé ; l'ingénieur ajuste en temps réel sur le terrain sa maille d'excavation (front de taille et profondeur) en fonction des mesures in situ (géologie, odeur, couleur, et mesure PID). D'autres facteurs participent aussi à ces différences : dépollution des bordures du site, excavation en forme de puits...
I	25%	B.E. : Sous-estimation non négligeable de l'estimation déterministe ainsi que du modèle géostatistique initial (sans effet de support) .	<ul style="list-style-type: none"> La modélisation déterministe ne comptabilise en volume pollué que les hauteurs de prélèvement analysées et supérieures au seuil de dépollution --> sous-estimation très significative du volume pollué. Recommandation : En cas d'excavation, se méfier d'estimations de volumes contaminés basées sur des modélisations des teneurs ponctuelles --> Prendre en compte l'effet de support !!
N	26%	D.O. : satisfait. Estimation sécuritaire. Le BE en charge du projet devient un partenaire privilégié pour ce type d'opération. B.E. : Sans commentaire particulier. Cas standard pour les pollutions de remblais sur ce type de site sensible.	<ul style="list-style-type: none"> Site complexe mais bien investigué Investigation : adapter la hauteur des échantillons à celle des mailles de dépollution (50 cm) Compléter le jugement d'expert par une méthode géostatistique permettant de préciser l'intérêt d'un tri fin des terres en amont des travaux
M	26%	D.O. : Évaluation non réaliste du volume finalement dépollué car elle ne prend pas en compte les conditions de gestion du chantier de dépollution. B.E. : Commentaire de 2005 : L'intérêt principal des méthodes statistiques et probabilistes est de pouvoir quantifier l'incertitude associée à une prédiction, par un processus mathématique.	<ul style="list-style-type: none"> La densité de sondages pourrait être augmentée (1 pour 383 m2) ainsi que celle des échantillons sur la verticale (1 pour 2 m) Inconnues sur les conditions de mise en œuvre de la géostatistique (prise en compte du changement de support?)
P	27%	D.O.: satisfait de la justesse du volume traité. B.E.: densité d'échantillonnage en diagnostic trop faible pour commencer un traitement, chantier à risque, refus de contrôler en dehors des zones sources, et tri très précis dans les zones en cours de traitement.	<ul style="list-style-type: none"> Nombreux critères défavorables à l'estimation des volumes : faible densité de sondages, recouvrement de la zone non assurée, estimation par jugement d'expert seul. L'amélioration des conditions d'investigation et l'emploi de méthodes d'interpolation permettrait d'améliorer les résultats Les écarts sont probablement sous-estimés en raison de contrôles en dépollution limités aux fouilles. Contrôle en dehors des fouilles nécessaire pour avoir une vision correcte de l'état complet de pollution du site.
V	27%	D.O. : Sous-estimation inacceptable des volumes. Chantier de dépollution initial arrêté. Tiers expert : une concentration des sols en bitume n'a pas de sens en soi car il s'agit toujours d'une boulette de produit pur mélangée par l'opérateur à une teneur très variable de sols.	Densité insuffisante de données. Caractère en « tout ou rien » de la pollution non prise en compte. Sondages d'investigation pas assez profonds. Recommandations : Diagnostic à baser sur de grandes tranchées. Ne pas se limiter aux seuls remblais, regarder dessous. En dépollution considérer des grandes mailles avec criblage et stockage en tas avant élimination.
E	32%	D.O. : Sous-estimation du volume de terres à traiter tout à fait significative pour un tel projet (explosion du budget de dépollution). Avec du recul, le D.O. pense qu'il aurait mieux valu privilégier un plus grand nombre de sondages, plus rapprochés, quitte à faire moins d'analyse par sondage. Une mauvaise classification des sols dans la zone centrale vers 3-6m a aussi été observée, probablement liée à l'interpolation déterministe (ponctuelle, 1 analyse valant pour la maille).	<ul style="list-style-type: none"> Ecarts expliqués par impacts très localisés, difficiles à identifier (p.ex. canalisation), estimation par interpolation sans changement de support, valorisation partielle des résultats des divers diagnostics Intégrer l'ensemble des données disponibles et prendre en compte le changement de support dans la modélisation

Cas	Erreur relative (%)	Commentaires DO et BE	Commentaires / Recommandations équipe projet
T	39%	D.O. : Fort écart – Mal accepté. La géophysique n'a pas détecté des fosses à goudron bétonnées. Il faudrait soigner les diagnostics avec un maillage resserré et des tranchées. B.E. : Technique utilisée (électrique) inopérante pour la détection de bitume pur.	<ul style="list-style-type: none"> Augmenter localement le nombre de sondages et utiliser la pelle mécanique. Prévoir des tris et contrôles importants en dépollution
S	42%	D.O. : Sous-estimation, inacceptable. B.E. : Sans commentaire. Profil bas.	<ul style="list-style-type: none"> Augmenter la densité de sondages, assurer l'homogénéité des conditions de prélèvement et le recouvrement homogène de la zone, ainsi que des prélèvements systématiques sur la verticale. Compléter le jugement d'expert par une méthode d'interpolation.
W	54%	D.O. : Surestimation inacceptable. La présentation de volumes précis mais finalement peu réalistes a déplu. Par contre, le krigeage est jugé intéressant pour orienter les excavations.	<ul style="list-style-type: none"> Difficultés à travailler avec des teneurs sur une pollution en « tout ou rien » (bitumes). Approche géostatistique basée sur le seuillage d'une carte de probabilité n'est pas adapté à l'estimation de volumes contaminés. Effet de support ignoré. <p>Recommandation : Avoir une approche d'investigation plus qualitative que quantitative au moyen de rainurages à la pelle mécanique. Les sondages sont trop ponctuels et ne permettent pas de détecter des fûts par exemple.</p>
U	72%	D.O. : Quantités à dépolluer moindres que prévu. Comme le traitement était sur site, cela n'a pas eu de conséquences financières. La géophysique ne sera plus préconisée sur des pollutions au bitume. B.E.: Diagnostic réalisé en plusieurs phases, sur plus de 10 ans d'intervalle. Implantation imprécise des sondages (pertes d'information, erreurs de positionnement...) Recommandations : Réaliser un levé précis (géomètre) des points de sondage. Prévoir une base de données + SIG+ géostatistique.	<ul style="list-style-type: none"> Site très complexe avec HAP, avec conditions d'investigation et d'estimation très défavorables. Augmenter la densité de sondages, assurer l'homogénéité de recouvrement de la zone par un maillage régulier ou systématique aléatoire, prélever des échantillons systématiquement sur la verticale Compléter le jugement d'expert par une méthode d'interpolation.
J	76%	D.O. : Traitement in situ considéré comme peu efficace. Sondages complémentaires préconisés par la géostat ont permis de réduire l'incertitude.	<ul style="list-style-type: none"> L'approche géostatistique (sélection des mailles présentant une probabilité donnée de dépasser le seuil de dépollution) n'est pas adaptée au calcul de volumes. Optimiser la répartition des sondages dans le plan et échantillons sur la verticale pour assurer un recouvrement homogène de la zone d'intérêt.
K	84%	D.O. : Très satisfait de la réhabilitation malgré l'écart entre les volumes de terres polluées estimés par le BE et les volumes réellement rencontrés sur le terrain.	<ul style="list-style-type: none"> Cas particulièrement complexe, donc difficile à estimer. Les investigations ne remplissent qu'une partie des facteurs identifiés comme éléments favorables. Combiner le jugement d'expert à une méthode d'interpolation.

4.3. Analyse comparative des cas

Une analyse statistique de l'impact de chacun des critères de comparaison sur l'erreur relative de prédiction est tout d'abord proposée. Ensuite, afin d'intégrer l'effet conjoint de plusieurs facteurs, les relations entre plusieurs groupes de facteurs et les niveaux d'écart sont discutées.

Il convient de bien garder à l'esprit le nombre limité de cas lors de l'interprétation des résultats obtenus.

4.3.1. Analyse statistique par facteur

- *Différences entre dépollutions in situ et ex situ (excavation) :*

Une petite partie des cas rassemblés ont été dépollués *in situ* (17% des cas). Les conditions de traitement et de contrôle de l'efficacité d'une intervention *in situ* étant très différentes de celles d'une dépollution par excavation, se pose la question de l'effet de ce mode de traitement sur les écarts entre l'estimation des masses de polluants en place en diagnostic et le calcul des masses de polluants extraites en dépollution.

Les statistiques des écarts relatifs par type de dépollution sont les suivantes. Le nombre de valeurs par classe est indiqué entre parenthèses à droite de la moyenne (certains cas offrent plusieurs comparaisons possibles) :

Dépollution	Moyenne des écarts
<i>In situ</i> (kg de polluants)	21% (6)
Excavation (m ³ de terres polluées)	29% (24)

Les cas traités *in situ* présentent donc des erreurs relatives d'estimation plus faibles que celles ayant été calculées sur les cas dépollués par excavation. Un examen des critères d'évaluation des sites montre que :

- Les sites traités *in situ* sont beaucoup plus densément investigués que les sites dépollués par excavation. La densité d'investigation est de 1 sondage pour 25 - 75 m² pour les sites traités *in situ*, alors qu'elle est de 1 sondage pour 250 - 300 m² en moyenne pour les cas traités par excavation.
- Les masses de polluants à extraire ont été estimées en diagnostic par des méthodes déterministes ou géostatistiques.
- Les sites traités *in situ* sont contaminés par des COHV (à l'exception d'un cas contaminé aux HC).
- La complexité de la situation de pollution est moyenne et liée essentiellement à la nature des polluants. Elle ne se démarque donc pas de celle observée dans les cas de traitement par excavation.

Même si cela est à prendre avec précaution vu le faible nombre de cas, il semblerait donc que les moyens mis en œuvre pour caractériser les sites amenés à être traités *in situ* soient plus importants que les sites dépollués par excavation. Le niveau de technicité apparaît aussi plus élevé.

Ces différences constatées entre les cas traités *in situ* ou par excavation ont conduit à analyser ensemble ou séparément les jeux de données dans la suite de l'analyse. Les statistiques obtenues en séparant les deux types de dépollution sont précisées ci-dessous lorsqu'elles se différencient de celles obtenues avec la totalité des cas.

- *Influence de la complexité de la situation de pollution sur l'erreur d'estimation :*

Différents facteurs ont été pris en compte pour apprécier la complexité de la situation de pollution : la multiplicité des activités ayant siégé sur le site au cours du temps, le nombre de groupes de substances qui ont été éliminés, l'hétérogénéité du terrain et la complexité du comportement des substances dans le sous-sol, liée à leurs propriétés physico-chimiques. Rappelons que les cas rassemblés sont tous plutôt complexes, cette complexité étant plus ou moins grande (pas de cas simples).

Le calcul des moyennes des erreurs relatives d'estimation par facteur de complexité fournit les résultats suivants :

Facteur de complexité	Forte complexité	Moindre complexité
	Moyenne des écarts	Moyenne des écarts
Multiples activités	29% (15)	23% (13)
Multiples polluants	35% (10)	21% (18)
Lithologie	37% (10)	21% (18)
Comportement des polluants	25% (20)	30% (8)

Les facteurs pour lesquels la différence entre complexité forte/moindre est la plus importante sont le nombre de substances (moyenne des écarts égale à 35% lorsque la complexité implique notamment de multiples polluants) et la complexité de la lithologie (moyenne des écarts égale à 37% pour les lithologies les plus complexes).

Un indice de complexité limité à ces 2 facteurs a donc été construit. Il prend la valeur 0 si le cas est mono-polluants avec une lithologie simple (un seul type de terrain, ou 2 types de terrain de constitution homogène), 1 si un des 2 facteurs au moins est complexe (multi-polluants et/ou 2 ou 3 types de terrain de constitution hétérogène). Les moyennes des erreurs d'estimation calculées en fonction des valeurs prises par cet indice sont les suivantes :

Complexité nb polluants - lithologie	Moyenne des écarts
Faible (indice : 0)	21% (14)
Forte (indice : 1)	32% (14)

Les erreurs d'estimation apparaissent en moyenne plus fortes (32%) dans des situations très complexes liées au nombre de polluants et à la lithologie, que dans des situations peu complexes (erreurs en moyenne égales à 21%).

S'agissant de la nature des polluants, notons également **que les cas ayant donné lieu aux écarts les plus significatifs sont tous concernés par une pollution en HAP sous forme de bitumes** (cas T, U, V, W).

- *Influence de la fiabilité du résultat de dépollution sur l'erreur d'estimation :*

L'analyse des cas rassemblés montre que les volumes de sols calculés en dépollution se basent sur des contrôles effectués en cours de travaux, dont le nombre et le type sont très variables. La fiabilité du calcul de dépollution étant dépendante de l'intensité de ces contrôles, un indice de fiabilité a été construit, et les statistiques des erreurs d'estimation relatives ont été calculées par niveau de fiabilité. Les résultats obtenus sont les suivants (nombre de cas systématiquement indiqué entre parenthèses ; notons que la fiabilité n'a pu être évaluée pour plusieurs cas, par manque d'information) :

Niveau de fiabilité	Moyenne des écarts
Mauvais à médiocre (indice : 0)	19% (10)
Bon à très bon (indice : 1)	29% (13)

On constate que **les sites dont le calcul de dépollution apparaît le plus fiable**, c'est-à-dire basé sur un plus grand nombre de contrôles, **présentent les plus forts écarts** entre estimation de diagnostic et calcul de dépollution. Plusieurs explications peuvent être trouvées à ce constat :

1. De plus grandes erreurs d'estimation sont révélées lorsque plus de contrôles sont effectués,
2. Les sites subissant le plus grand nombre de contrôles sont des sites plus complexes, donc plus difficiles à estimer,
3. Les contrôles intensifs réalisés en phase travaux peuvent découler d'un souhait de compenser des sites faiblement investigués, dont l'estimation de diagnostic est donc peu fiable,
4. Des contrôles intensifs en phase travaux peuvent sembler moins nécessaires lorsque le site a été finement caractérisé en diagnostic.

La première explication ne peut être prouvée, mais est probable.

La comparaison des indices de complexité des sites dont le calcul de dépollution est fiable, avec ceux dont le calcul est jugé moins fiable, ne fait pas apparaître de différence significative, ce qui incite à rejeter la deuxième explication.

On recense 5 sites dont la fiabilité est bonne (indice 1) et les conditions d'investigation en diagnostic sont insatisfaisantes (indice 0). La moyenne des écarts observés sur ces sites est de 45%. Il y a par ailleurs 6 sites dont la fiabilité est bonne, et les conditions d'investigation en diagnostic sont satisfaisantes (indice 1). La moyenne des écarts pour ces sites est de 18%. Ces différences sembleraient étayer la troisième hypothèse.

Un seul site présente à la fois une fiabilité insatisfaisante des résultats de dépollution et des conditions satisfaisantes d'investigation de diagnostic insatisfaisantes (écart : 19%), ce qui ne permet pas d'évaluer la pertinence de l'hypothèse 4. Quelle que soit l'explication, il a été jugé utile de tenir compte de ce constat dans l'analyse et l'interprétation des résultats, en séparant dans certains cas les deux jeux de données.

- *Influence de l'ancienneté de l'intervention sur l'erreur d'estimation :*

Un indice d'ancienneté de l'intervention a été construit pour évaluer l'influence de la durée et de la période d'intervention (diagnostic et dépollution) sur le site sur les calculs estimatifs des quantités à dépolluer. L'indice est égal à 0 si l'intervention est récente et courte (>2010 et moins de 5 ans), 2 si l'intervention est ancienne et longue (<2010 et > 5 ans), 1 en situation intermédiaire.

Les erreurs d'estimation calculées par niveau d'ancienneté sont les suivantes :

Niveau d'ancienneté	Moyenne des écarts
Récent (indice : 0)	25% (10)
Moyen (indice : 1)	28% (9)
Ancien (indice : 2)	29% (7)

Le niveau d'ancienneté n'apparaît pas un facteur discriminant pour les erreurs d'estimation des cas rassemblés.

- *Influence de la méthode d'estimation en phase diagnostic :*

Plusieurs statistiques associées aux écarts relatifs entre estimation de diagnostic et calcul de dépollution calculées en fonction de la méthode d'estimation employée sont données dans le tableau ci-dessous, pour l'ensemble des cas rassemblés :

Méthode d'estimation	N	Min	Q50	Max	Moyenne	Ecart-type
Méthode empirique seule	13	1%	27%	72%	27%	19%
...ou complétée par méth. déterministe	5	1%	25%	84%	30%	33%
...ou complétée par méth. géostatistique	10	2%	16%	76%	23%	24%
→ dont Géostatistique correcte	6	2%	6%	26%	10%	10%

Les calculs effectués mettent en évidence plusieurs résultats :

- **Les erreurs d'estimation moyennes les plus fortes sont observées lorsque des méthodes empiriques (ou par jugement d'expert),** ont été appliquées ou bien en combinant ces méthodes avec des méthodes déterministes. Cela est d'autant plus vrai si l'on s'intéresse aux médianes, qui estiment de manière plus robuste la tendance centrale de ces écarts.
- **Les méthodes géostatistiques produisent des erreurs d'estimation plus réduites.**
- **L'efficacité des méthodes géostatistiques est particulièrement marquée lorsque celles-ci sont appliquées dans les règles de l'art** (p.ex. choix d'une méthode appropriée, prise en compte de l'effet de support, dégroupement en cas de besoin, etc.).

Ces calculs ont été répétés en limitant le jeu de données aux situations où les résultats de dépollution sont fiables (contrôles intensifs en phase travaux) et où le traitement a été exécuté *in situ* (niveau de technicité plus élevé du diagnostic) :

Méthode d'estimation	Nb de cas	Médiane des écarts	Moyenne des écarts
Méthode empirique seule	3	37%	33%
...ou complétée par méth. déterministe	4	29%	36%
...ou complétée par méth. géostatistique	6	30%	40%
→ dont Géostatistique correcte	3	2%	4%

Le nombre de situations par méthode est très faible dans ce sous-ensemble (3 à 6 cas pour calculer une moyenne des erreurs d'estimation), ce qui limite la représentativité des statistiques. On note néanmoins ici encore des écarts nettement plus faibles lorsqu'une approche géostatistique correctement mise en œuvre vient compléter un jugement d'expert classique.

- *Influence de la qualité des investigations en diagnostic :*

La qualité globale des investigations en diagnostic est qualifiée par un indice prenant des valeurs allant de 0 à 1 à mesure que la qualité augmente. Les moyennes et médianes des erreurs d'estimation calculées en fonction des valeurs prises par cet indice sont fournies ci-dessous, pour l'ensemble des situations puis en se limitant aux cas de traitement *in situ* et aux résultats de dépollution fiables.

Qualité des investigations	Toutes situations			Dépollutions fiables et traitement <i>in situ</i>		
	Nb	Médiane	Moyenne	Nb	Médiane	Moyenne
0 (médiocre)	16	26%	32%	5	39%	45%
1 (bonne)	11	19%	18%	8	19%	19%

Dans les deux cas, **les erreurs d'estimation apparaissent en moyenne d'autant plus faibles que la qualité des investigations est bonne.**

4.3.2. Analyse statistique multi-facteurs

En vue d'estimer correctement les quantités de terres ou masses de polluants à traiter, les analyses statistiques uni-variées menées précédemment tendent à démontrer :

- l'importance de la qualité des conditions d'investigation,
- l'efficacité des méthodes géostatistiques, qui produisent globalement des écarts plus faibles et moins dispersés que les autres approches.

Ces conclusions, et en particulier celle relative aux méthodes géostatistiques, peuvent être mises en doute puisque l'influence de ces facteurs sur les estimations a été évaluée en ne tenant pas compte de l'influence des autres facteurs.

Les bons résultats obtenus avec la géostatistique sont peut-être dus à une meilleure qualité de l'investigation de diagnostic. Ou bien les sites sur lesquels la géostatistique a été appliquée présentent peut-être une moindre complexité de la situation de pollution, et sont donc plus faciles à modéliser.

Pour répondre à ces questions, des sites présentant un même niveau de complexité et une même qualité d'investigation ont été recherchés parmi les sites dont le calcul des terres excavées en phase travaux est jugé fiable, ou bien parmi les sites traités *in situ*.

Trois sites ont ainsi été identifiés. Ils sont de complexité moyenne et deux sur trois présentent une bonne qualité d'échantillonnage (cas C et G). Leurs données de diagnostic ont été utilisées pour exécuter plusieurs estimations, par différentes méthodes, ce qui permet de comparer leur efficacité :

- Méthode empirique seule ou complétée par une méthode géostatistique avec erreur méthodologique (application de seuils à une carte krigée) et une méthode géostatistique appliquée dans les règles de l'art pour le cas C,
- Méthode empirique seule ou complétée par une approche géostatistique correcte pour le cas D,
- Méthode empirique complétée par une méthode déterministe et également deux approches géostatistiques, d'une part avec erreur méthodologique (non prise en compte de l'effet de support) et d'autre part dans les règles de l'art pour le cas G.

Cas	Empirique	+ déterministe	+ géostatistique erronée	+ géostatistique correcte
C	24%		13% (krigeage)	2% (simulations)
D	30%			3%
G		37%	30% (sans effet de support)	8% (avec effet de support)

Les erreurs d'estimations calculées pour ces différentes méthodes confirment que, pour un même niveau de complexité (moyenne) de la pollution et une même (bonne) qualité d'échantillonnage, les méthodes géostatistiques constituent la meilleure alternative, parmi les méthodes d'estimation à disposition. L'efficacité de la méthode est particulièrement élevée lorsqu'elle est appliquée dans les règles de l'art.

Notons que l'on peut également argumenter que le jugement d'expert peut aussi fournir d'excellents résultats lorsqu'il est bien réalisé, ce qui est indubitable. Un des avantages néanmoins dans le cas présent est que les critères permettant d'assurer que la réalisation de l'étude géostatistique a été effectuée dans les règles de l'art sont objectifs et clairement identifiés.

Cet avantage de la géostatistique est-il remis en cause dans des situations où la qualité des conditions d'investigation est moindre ? Parmi les cas rassemblés, il n'existe pas de situations de même niveau de complexité et de mauvaise qualité d'investigation, dont les quantités à dépolluer auraient été estimées avec une approche géostatistique et d'autres types de méthodes. Ce point ne peut donc pas être vérifié avec les données disponibles. Sur les cas rassemblés, on constate en effet que les méthodes géostatistiques ont plutôt été utilisées sur des sites qui ont fait l'objet d'investigations de qualité légèrement meilleure.

Méthode d'estimation	Proportion de cas bien investigués
Méthode empirique seule	33% (4 cas sur 12)
...ou complétée par méth. déterministe	20% (1 cas sur 5)
...ou complétée par méth. géostatistique	50% (4 cas sur 8)

Cela signifie-t-il que la perspective d'une utilisation de la géostatistique incite à de meilleures pratiques d'investigation ou en tout cas à porter plus de vigilance à cet point ? Les outils de l'analyse exploratoire, première étape d'une étude géostatistique, conduisent en effet à une analyse critique des données, pouvant mettre en lumière des schémas d'échantillonnage et des protocoles inappropriés. En outre, on peut penser que les personnes sensibilisées à la géostatistique le sont également à l'importance de la qualité des conditions d'investigation. Ce biais ne semble toutefois pas affecter le site C, puisque la géostatistique y a été appliquée a posteriori, sur des données qui n'avaient pas été collectées dans l'objectif d'appliquer ce type de méthode. Les résultats de l'estimation géostatistique apparaissent pourtant meilleurs, en termes d'écarts relatifs au calcul de dépollution, que ceux obtenus par les autres méthodes.

Nous nous sommes finalement intéressés à l'effet conjoint de la complexité et de la qualité des investigations sur la qualité de la prédiction des volumes. Les moyennes des erreurs d'estimation ont ainsi été calculées par niveau de complexité et en fonction de la qualité de l'échantillonnage.

Les calculs ont été effectués sur l'ensemble des cas rassemblés et sur la sélection des cas dont les résultats de dépollution sont fiables.

		Complexité de la situation de pollution			
		Tous les cas		Cas fiables seulement	
		0	1	0	1
Qualité des investigations	0	22% (6)	38% (10)	39% (2)	50% (3)
	1	20% (8)	14% (3)	19% (6)	17% (2)

Malgré le nombre limité de cas, on note que les meilleures prédictions sont logiquement observées pour les sites les moins complexes et ayant fait l'objet d'un échantillonnage de qualité. En outre, pour une même qualité d'échantillonnage, on aurait pu s'attendre à ce que l'erreur d'estimation augmente avec la complexité de la situation de pollution ; cela n'est pas le cas, ce qui pourrait s'expliquer par un nombre de cas insuffisant ou une qualité d'investigation meilleure pour les cas complexes.

N'ayant que peu de prise sur la complexité de la situation, cela montre d'autant plus l'importance de la qualité de l'échantillonnage pour réduire le risque d'incohérences entre diagnostic et dépollution.

ANALYSE COMPARATIVE DES CAS

ERREURS RELATIVES D'ESTIMATION MOYENNES :

- Plus faibles pour les cas traités in situ (21%) que pour les cas de dépollution par excavation (29%)
- Plus fortes dans des situations très complexes liées au nombre de polluants et à la lithologie (nombre et hétérogénéité des sols) (32%) que dans des situations peu complexes (21%)
- Les plus élevées concernent les cas de pollutions aux hydrocarbures sous forme de bitumes (30% à 75%)
- Plus élevées en cas de résultats de dépollution fiables (29%) qu'avec des résultats peu fiables (19%)
- Plus faibles lorsque la qualité des investigations est bonne (18%) que lorsque celle-ci est médiocre ou mauvaise (32%)
- Sensiblement plus faibles lorsqu'une méthode géostatistique est adoptée (23%), notamment lorsqu'elle est appliquée dans les règles de l'art (10%), qu'avec une méthode empirique (27%) ; les résultats sont également moins dispersés avec la géostatistique (données insuffisantes pour conclure sur les méthodes déterministes)
- Avantage de la géostatistique confirmé pour des cas de complexité (moyenne) et de conditions d'investigation (bonnes) équivalentes (pas de données pour l'évaluer en situations très complexes ou dans de mauvaises conditions d'investigation)
- L'ancienneté des diagnostics n'apparaît pas comme un facteur déterminant

5. Synthèse et recommandations

Avant de synthétiser l'analyse qui vient d'être menée et de proposer des recommandations opérationnelles issues de ce travail, soulignons quelques limites inhérentes à la méthodologie développée dans le cadre du projet. Tout d'abord, bien que leur nombre soit déjà conséquent, les 23 cas recensés ne permettent pas de répondre de manière significative et irréfutable à l'ensemble des questions posées, tant les facteurs jouant un rôle sur la qualité des prédictions de volumes/masses sont nombreux. Ensuite, l'évaluation elle-même de ces facteurs contient une part d'arbitraire inéluctable.

5.1. Synthèse

Les données recueillies, combinées aux retours du questionnaire qualitatif, apportent plusieurs enseignements et renforcent certaines connaissances empiriques.

- *Ordre de grandeur des écarts entre diagnostic et dépollution*

Sur base des résultats du questionnaire, on peut avancer que **des écarts significatifs entre diagnostic et dépollution, supérieurs à 25%, sont observés dans approximativement 25% des cas. Cela montre qu'une majorité de chantiers se passe bien**, sans mauvaises surprises pouvant prêter à des conséquences lourdes, que ce soit en termes de délais, de budgets ou allant jusqu'à des litiges. Par rapport à cette proportion d'écarts significatifs formulée par les acteurs des sites et sols pollués via le questionnaire, les 23 cas recensés conduisent à des écarts légèrement plus importants, de plus de 30% dans 1/3 des situations. Ceci n'est pas étonnant, plusieurs cas ayant été mis à disposition de l'étude justement en raison des problèmes qu'ils avaient pu soulever.

L'estimation de diagnostic a sous-estimé la quantité à extraire en dépollution dans 16 situations (57%), surestimé dans les 12 autres (43%). Cela signifie que les erreurs de prédiction conduisent plutôt plus fréquemment lors de la dépollution à de mauvaises surprises et des pollutions imprévues ou sous-estimées.

- *Comparabilité des volumes de terres (ou masses de polluants) entre diagnostic et dépollution*

Il est rapidement apparu que la comparaison entre la prédiction de volumes en phase diagnostic et les volumes finalement dépollués constitue déjà en soi un exercice délicat. **En effet, toute estimation est entachée d'incertitudes et d'erreurs, même en phase de dépollution ; le calcul réalisé en phase dépollution ne peut donc être considéré comme la référence absolue.** En outre, de nombreux facteurs viennent entacher la fiabilité d'une telle comparaison : différence de périmètre entre diagnostic et travaux, changement d'objectifs ou prise en compte de nouveaux polluants, mise en évidence de pollution résiduelle lors de la dépollution ou au contraire volonté explicite de ne pas dépolluer l'ensemble de la pollution, notamment au droit d'infrastructures dans le cas de sites en activité, nature et exhaustivité des contrôles réalisés en cours de dépollution, etc.

Cette comparaison s'avère encore plus délicate dans le cas de traitements *in situ* ; en effet, dans ces situations, les masses de polluants ne peuvent être estimées que de manière indirecte, par suivi de l'évolution dans le temps des concentrations dans l'air ou l'eau extraits par exemple.

Finalement, en présence de plusieurs filières d'élimination des terres, la cohérence du volume contaminé global entre diagnostic et dépollution n'est pas incompatible avec d'éventuelles erreurs pour certaines filières ou d'erreurs sur les polluants impliqués.

C'est cette situation qui nous a conduit à définir un **critère de fiabilité des résultats de dépollution, en fonction de l'intensité des contrôles** effectués en cours et en phase de réception des travaux, et à mener les comparaisons avec la totalité des cas, ou bien les seuls cas dont les résultats de dépollution sont jugés fiables. Une attention particulière a également été portée à la définition de la zone d'intérêt de chacun des cas.

- *Facteurs favorables/défavorables pour la prédiction*

La complexité de la situation de pollution joue un rôle primordial sur la qualité des prédictions menées en phase diagnostic. A ce titre, il est notable que les cas ayant donné lieu aux écarts les plus significatifs correspondent tous à des pollutions par des hydrocarbures lourds et des HAP sous forme de bitumes, par nature délicats à caractériser.

Outre cette complexité qui ne peut qu'être anticipée ou à défaut constatée, il a été montré que **l'échantillonnage est le premier facteur permettant de limiter le risque d'erreur de prédiction de volumes de terres ou de masses de polluants.**

S'agissant des méthodes d'estimation, de très bonnes prédictions ont été identifiées dans certains cas quelle que soit la méthode d'estimation mise en œuvre : méthode empirique (ou par jugement d'expert) seule ou complétée par une approche déterministe ou une estimation géostatistique. Pour autant, les prédictions basées sur les jugements d'expert donnent lieu à la plus grande dispersion des écarts entre diagnostic et dépollution. A contrario, **l'estimation géostatistique semble conduire aux écarts à la fois les moins élevés et les moins dispersés lorsqu'elle est menée dans les règles de l'art** en respectant quelques recommandations méthodologiques objectives. Le nombre très limité de cas impliquant une approche déterministe empêche toute conclusion.

Ajoutons que l'expertise du professionnel SSP, si elle est systématiquement utilisée, devient de plus en plus cruciale lorsque la complexité de la situation augmente ou que les conditions d'investigation se dégradent.

Finalement, comme le note un des membres du comité d'experts, ces résultats confortent largement l'intuition selon laquelle « un expert compétent utilisant judicieusement la géostatistique sur un site bien investigué donnera l'estimation de volume la plus fiable ».

Inversement, il est important d'affirmer avec clarté que toute prédiction de volumes/masses sur un site complexe mal investigué ne pourra qu'être source de sérieuses désillusions.

5.2.Recommandations

L'analyse des cas rassemblés permet de tirer un certain nombre d'enseignements et de dégager des recommandations opérationnelles pour améliorer la cohérence entre les estimations en phase diagnostic et la dépollution. Les facteurs ayant une influence sur la qualité des estimations sont hiérarchisés dans les paragraphes suivants par ordre d'importance décroissante, afin d'identifier les points sur lesquels l'effort doit être porté en priorité pour améliorer la qualité des décisions prises à l'issue des diagnostics.

Ces recommandations sont à considérer en gardant à l'esprit :

- d'une part qu'il est toujours possible d'avoir de la chance en réalisant une bonne prédiction en dépit de conditions défavorables et de pratiques critiquables (situation complexe, caractérisation insuffisante...);
- d'autre part, que malgré des pratiques exemplaires, le risque d'une « erreur radicale » [9] n'est jamais exclus et inhérent à tout exercice de prédiction ou d'estimation ; ce type d'erreur résulte en général de pollutions très localisées ou à des niveaux non caractérisés ;
- que d'autres pratiques peuvent être pertinentes, mais que celles qui sont suggérées ci-dessous apparaissent appropriées pour une large gamme de situations de pollution.

1. Complexité de la situation de pollution

L'étude montre que le niveau de complexité de la situation de pollution a une influence déterminante sur les écarts qui peuvent être attendus entre prédiction en phase diagnostic et résultat de dépollution. **Des erreurs d'estimation significatives sont inévitables dans les contextes de pollution les plus complexes. Le risque d'observer de telles erreurs peut être limité sous certaines conditions d'investigation, mais il ne peut pas être réduit de la même façon que dans des contextes de pollution plus simples.** Etant entendu qu'il n'est pas possible d'influer sur cette complexité, il est crucial de se prémunir contre un risque élevé d'erreur par un effort d'investigation raisonnable et des moyens de contrôle accrus lors des travaux de dépollution.

Les situations sont particulièrement complexes, et donc difficiles à estimer, lorsque plusieurs types de substances et/ou des terrains hétérogènes doivent être dépollués. La nature des substances à traiter et le nombre d'activités à l'origine de la contamination apparaissent comme des facteurs moins déterminants.

Les situations les plus difficiles à estimer révélées par l'étude sont les cas de pollution aux hydrocarbures lourds (HAP), présents sous forme de « boulettes » dans le sol. **Les écarts observés dépassent alors les 30% pour atteindre près de 75% dans certains sites.**

2. Conditions d'investigation en diagnostic

Plusieurs guides méthodologiques et normes recensent déjà un certain nombre de bonnes pratiques liées aux investigations et ce travail n'a pas vocation à s'y substituer. Pour autant, l'étude permet de

dégager des conditions d'investigation favorisant la réduction des erreurs d'estimation en diagnostic en vue du dimensionnement de la poche de pollution :

- Le protocole d'investigation est homogène,
- Les sondages sont répartis selon un maillage ou couvrent la zone d'intérêt de manière homogène,
- Les échantillons sont prélevés systématiquement sur la verticale, en évitant de mélanger différentes longueurs pour les prélèvements,
- La densité de sondages doit idéalement être d'au moins 1 sondage pour 100 m² de terrain,
- Le nombre d'échantillons prélevés dans chaque sondage est au minimum de 1 par mètre sur la verticale.

L'analyse des cas montre que si 4 ou 5 de ces critères sont respectés, alors les erreurs d'estimation sont de 18% en moyenne, au lieu de 32%. Le résultat est encore plus net lorsque l'on considère uniquement les cas pour lesquels le résultat de dépollution est jugé fiable (voir ci-dessous) : les erreurs sont de 19% en moyenne, au lieu de 45% si 3 de ces conditions au plus sont garanties.

Dans le cas de pollutions ou terrains très hétérogènes, sans risques de pertes par volatilisation, le recours à la pelle mécanique pourra en outre permettre de mieux caractériser la pollution en place.

RECOMMANDATIONS : INVESTIGATIONS DE DIAGNOSTIC

- Protocole d'investigation homogène
- Sondages répartis selon un maillage ou recouvrant de manière homogène la zone d'intérêt
- Au moins 1 sondage pour 100 m² de terrain
- Prélèvement systématique d'échantillons sur la verticale
- Au moins 1 échantillon par mètre sur la verticale

3. Méthode d'estimation en diagnostic

La qualité des investigations qui auront pu être menées en phase de diagnostic a une influence prioritaire sur le résultat d'estimation : celui-ci sera médiocre quelle que soit la méthode d'estimation choisie si les conditions d'investigation le sont aussi.

L'étude révèle néanmoins l'avantage de certaines pratiques d'estimation. Si les approches empiriques (par jugement d'expert) donnent dans certains cas de très bons résultats, on note une dispersion très forte des écarts relevés pour ces méthodes ; il est en outre illusoire de vouloir identifier les facteurs de réussite d'un tel jugement d'expert, par nature subjectif.

La mise en œuvre d'une approche géostatistique, en complément du jugement d'expert, contribue à une amélioration de la cohérence entre diagnostic et dépollution sous réserve qu'elle soit appliquée dans les règles de l'art.

Les facteurs de succès d'une estimation géostatistique identifiés par l'étude sont :

- **Le choix d'une méthode adaptée au problème posé.** Le krigeage, classique pour la cartographie des concentrations, n'est par exemple pas adapté au problème de l'estimation de volumes de terres dépassant des seuils. La génération de simulations conditionnelles et leur post-traitement doit lui être préféré.
- **La modélisation du changement de support** survenant entre la phase de diagnostic et la phase de dépollution, notamment en cas d'excavation. L'estimation des volumes à extraire doit prendre en compte la taille des mailles d'excavation, bien que les échantillons de diagnostic soient de plus petite taille.

Les méthodes déterministes associées au jugement d'expert apparaissent ici moins favorables qu'un jugement d'expert seul ou associé à un traitement géostatistique. Les cas recensés sont cependant trop peu nombreux pour généraliser ce constat à l'ensemble des sites pollués.

Afin d'aller plus loin, le tableau de la page suivante affine la pertinence des différentes méthodes d'estimation envisageables en fonction de la complexité de la situation de pollution et des conditions d'investigation. S'agissant de la complexité, rappelons que les 23 situations de pollutions étudiées sont dans leur grande majorité complexes à très complexes. Pour les situations simples et des conditions d'investigations favorables, l'approche empirique par jugement d'expert sera vraisemblablement adaptée et pourra éventuellement être enrichie par une approche géostatistique si les données sont en nombre suffisant. Lorsque les conditions d'investigation de tels cas simples sont défavorables, toute approche quantitative (déterministe ou géostatistique) ne pourra être envisagée qu'avec prudence et le jugement d'expert pourra quant à lui juste permettre de pallier partiellement les médiocres conditions d'investigation.

RECOMMANDATIONS : METHODE D'ESTIMATION EN DIAGNOSTIC

Tableau 6 : Evaluation de la pertinence des différentes méthodes d'estimation envisageables en fonction de la complexité de la situation de pollution et des conditions d'investigation ; vert : méthode adaptée, jaune : méthode moyennement adaptée, orange : méthode à proscrire et/ou situation à vraiment éviter dans la mesure du possible (cas en bas à droite).

		Complexité de la situation de pollution	
		Moyenne	Forte
Conditions d'investigation	Favorables	Empirique : Des conditions d'investigations favorables peuvent laisser espérer qu'un jugement d'expert puisse fournir de bons résultats si la complexité de la situation reste moyenne.	Empirique : Des conditions d'investigations vraiment favorables peuvent encore laisser espérer qu'un jugement d'expert puisse fournir des résultats acceptables si la complexité est élevée.
		+Déterministe : Dans pareille situation, l'approche déterministe aura comme unique valeur ajoutée une aide à la visualisation de la répartition spatiale des concentrations, notamment à 3 dimensions.	+Déterministe La complexité élevée de la situation de pollution ne pourra usuellement pas être prise en compte par une approche déterministe d'interpolation.
		+Géostatistique : Les conditions d'investigations permettent dans ce cas de compléter le jugement d'expert par une estimation géostatistique plus quantitative et une évaluation des incertitudes associées aux quantités à dépolluer.	+Géostatistique : Les conditions d'investigations permettent de compléter le jugement d'expert par une estimation géostatistique plus quantitative et une évaluation des incertitudes associées aux quantités à dépolluer. Ces incertitudes seront cruciales à évaluer en raison de la complexité élevée de la situation.
	Défavorables	Empirique : Le jugement d'expert pourra partiellement pallier des conditions d'investigation médiocres lorsque la complexité de la situation reste moyenne.	Situation à éviter absolument En cas de situations de pollution très complexes, des conditions d'investigation particulièrement réfléchies et favorables sont indispensables, tout comme des contrôles accrus en dépollution. Si les conditions d'investigation sont défavorables, il faut alors accepter un risque important d'écart très significatif entre diagnostic et dépollution, et ce quelque soit la méthode d'estimation mise en œuvre. Le jugement d'expert sera néanmoins à privilégier, éventuellement complété dans certains cas par une approche géostatistique afin de quantifier, avec prudence, les incertitudes associées aux estimations de volumes/masses.
		+Déterministe : Les conditions d'investigation défavorables doivent conduire à proscrire des interpolations rapides déterministes et automatiques.	
		+Géostatistique : Les possibilités de modélisation plus riche offertes par la géostatistique permettront dans certains cas de pallier les défauts ou biais d'investigation.	

4. Valorisation des informations indirectes

L'étude révèle que des données renseignant de manière indirecte sur le niveau de pollution des sols, telles que les valeurs mesurées au PID ou au XRF, les diagraphies MIP, ou bien encore les observations organoleptiques, ne sont généralement pas utilisées explicitement pour estimer les quantités de terres ou masses de substances à dépolluer. Leur utilisation est souvent limitée au choix des échantillons sur le terrain, voire dans certains cas dans une approche empirique par jugement d'expert et de façon implicite. **Ces informations permettraient pourtant de réduire les erreurs d'estimation**, sous réserve de corrélation entre ces informations et les concentrations en substances constituant la variable d'intérêt.

De même, on constate que les estimations sont souvent menées à partir d'un nombre limité de polluants d'intérêt ou indicateurs de pollution (1 ou 2), en ne tenant pas compte de la corrélation qui peut exister avec d'autres substances ou paramètres physico-chimiques qui ont été mesurés. Là encore ces informations gagneraient à être intégrées dans la modélisation pour réduire les erreurs.

RECOMMANDATIONS : INFORMATIONS INDIRECTES

- Etudier la corrélation entre teneurs en polluants et informations indirectes
- Intégrer les données indirectes dans l'estimation de diagnostic en cas de « bonne » corrélation

5. Fiabilité des résultats de dépollution

L'étude conduit à un résultat inattendu relatif aux calculs des quantités effectivement dépolluées au terme d'un chantier de dépollution par excavation, qui constitue la référence à laquelle est comparée l'estimation de diagnostic. **Le niveau de fiabilité de ces calculs est variable selon la nature et l'intensité des contrôles effectués en cours de dépollution.**

Selon les sites, des contrôles analytiques peuvent en effet être menés :

- Dans et en bordure de fouilles,
- A l'intérieur des fouilles,
- En dehors des fouilles.

Les volumes de sols pollués résiduels peuvent de plus être estimés dans certains sites, à partir de compléments d'investigation. Mais ces contrôles ne sont pas systématiquement effectués.

Pour les besoins de l'étude, un résultat de dépollution a été jugé fiable si au moins 3 de ces 4 contrôles avait été effectué. Les statistiques des erreurs d'estimation se sont révélées de fait significativement différentes, selon que toutes les données, ou bien uniquement celles relatives aux résultats fiables de dépollution, étaient considérées.

Bien que ce ne soit pas l'objet de la présente étude, ce résultat montre qu'il serait probablement utile de mettre en place de bonnes pratiques de contrôle de la dépollution, afin d'augmenter la fiabilité des résultats de dépollution.

Le contrôle de l'efficacité des traitements *in situ* est effectué différemment, souvent par la combinaison d'un bilan de masse et d'investigations complémentaires des sols en place après traitement. Se posent dans ce cas, non seulement la question de la fiabilité des résultats de dépollution, mais aussi celle de la méthodologie à adopter pour comparer les résultats de bilans de masse en dépollution avec les estimations de diagnostic menées à partir de quantités de substances dans les sols en place.

RECOMMANDATIONS : CONTRÔLES EN DEPOLLUTION

- Contrôles en bordure et fond de fouille
- Contrôles de la qualité des terres excavées
- Contrôles à la périphérie de la zone de traitement
- Absence de pollution résiduelle ou quantification de cette dernière si elle a été détectée

5.3. Retour sur les cas d'étude

Une fois établies ces recommandations générales à partir de l'analyse statistique des informations rassemblées sur les cas d'étude, un retour sur les fiches détaillées de présentation des cas a été mené pour évaluer dans quelle mesure ces critères avaient été appliqués et quelle en a été la répercussion sur l'écart entre estimation de diagnostic et résultat de dépollution.

Cet exercice a permis de valider la pertinence des facteurs de succès identifiés par l'analyse statistique des cas, et de fournir un avis d'expert sur chacune des fiches sur « ce qui aurait dû » être fait pour améliorer, le cas échéant, la prédiction. Nous invitons le lecteur à consulter les fiches pour prendre connaissance de ces recommandations spécifiques.

Quelques cas d'étude sont ici mis en lumière pour illustrer et moduler les recommandations formulées ci-dessus.

- **Le cas A est un exemple de cas modèle**, pour lequel tous les critères de réduction de l'incertitude ont été remplis. L'écart entre estimation de diagnostic et résultat de dépollution est de **2%, en sous-estimation**. Il s'agit d'une ancienne blanchisserie dont le terrain calcaire et marno-calcaire est atteint par des hydrocarbures chlorés (perchloréthylène). Le site a été dépollué par la combinaison d'un traitement *in situ* par venting et d'un traitement hors site après excavation des sols. La totalité des facteurs de succès identifiés dans la présente étude est respectée :
 - Le cas est moyennement complexe (sachant que tous les sites de l'étude sont plutôt complexes),
 - Le site a subi un traitement *in situ*, ce qui induit une intensité et un niveau de technicité des investigations élevés (en tout cas sur les quelques situations étudiées),
 - Les investigations de diagnostic remplissent 4 des 5 facteurs identifiés comme favorables à la réduction des écarts : densité de sondage de 1 pour 40 m², protocole d'échantillonnage homogène, échantillons prélevés de manière systématique et orientée sur la verticale, plus d'1 échantillon prélevé par mètre sur la verticale,
 - En complément du jugement d'expert, l'estimation de diagnostic a été réalisée par des méthodes géostatistiques mises en œuvre dans les règles de l'art.

LE CAS MODELE : 2% D'ERREUR EN SOUS-ESTIMATION

CARACTERISTIQUES

- Ancienne blanchisserie
- Marno-calcaires
- Perchloréthylène
- Traitement *in situ* (venting) combiné à une excavation des sols

FACTEURS DE SUCCES

- Situation moyennement complexe
- Niveau de technicité élevé
- 4 des 5 critères de qualité d'investigation :
 - Protocole homogène
 - 1 sondage pour 40 m²
 - Echantillonnage systématique et orienté sur la verticale

- > 1 échantillon par mètre
- Géostatistique dans les règles de l'art

- **A contrario, aucun des facteurs de succès n'est réuni sur le cas U**, et l'erreur d'estimation y est élevée : **72% en surestimation**. Ce site est un ancien dépôt de produits pétroliers et usine de bitumes émulsionnés, implanté sur des remblais, limons, sables et marnes. Les sols souillés aux hydrocarbures lourds ont été excavés pour un traitement sur site en biopile. Or les phases de diagnostic cumulent des éléments identifiés comme particulièrement défavorables à une bonne estimation des volumes :
 - Le cas est parmi les plus complexes, car plusieurs types de substances (HC, HAP) et plusieurs types de terrain devaient être dépollués. De plus, ce sont les cas de pollution aux HAP qui présentent les plus grandes erreurs d'estimation.
 - La densité de sondages est de 1 pour 286 m² (soit nettement inférieure au 1 pour 100 m² recommandé), le recouvrement de la zone d'intérêt par les sondages n'est pas homogène (zones sur- et sous-échantillonnées), le protocole de prélèvement est hétérogène et l'échantillonnage sur la verticale est orienté (le nombre d'échantillons sur la verticale n'est pas connu).
 - L'estimation a été exclusivement réalisée par un jugement d'expert.

En dépit du caractère particulièrement complexe de la situation de pollution, certaines pratiques auraient probablement pu améliorer l'estimation de diagnostic :

- Une densité plus grande de sondages avec le recours à une pelle mécanique afin de mieux caractériser les terrains traversés et la nature de la pollution (boulettes),
- Un protocole de prélèvement homogène,
- Un recouvrement homogène de la zone d'intérêt par un maillage régulier ou systématique aléatoire de sondages,
- Des prélèvements systématiques d'échantillons sur la verticale,
- Une estimation des quantités de terres à traiter par une méthode d'interpolation venant compléter le jugement d'expert, les méthodes géostatistiques ayant l'avantage de permettre l'estimation de l'incertitude affectant les estimations de quantités.

LE CONTRE-EXEMPLE : 72% D'ERREUR EN SUR-ESTIMATION

CARACTERISTIQUES

FACTEURS D'ECHEC

- | | |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Ancien dépôt pétrolier et usine à bitumes • Remblais, limons, sables et marnes • Hydrocarbures lourds, HAP • Traitement sur site par biopile | <ul style="list-style-type: none"> • Situation très complexe • Critères de qualité d'investigation non remplis : <ul style="list-style-type: none"> ○ Protocole hétérogène ○ 1 sondage pour 286 m² ○ Zones sur-échantillonnées et lacunaires ○ Echantillonnage orienté sur la verticale • Estimation par méthode empirique |
|---|---|

- **Certains cas présentent en revanche une situation moins contrastée. Ainsi, l'erreur d'estimation est forte pour le cas J, 76% en surestimation, alors que certains critères favorables à une bonne estimation sont remplis :** le cas ne présente pas de forte complexité, puisqu'un seul type de substances (hydrocarbures lourds) dans un seul type de terrain devait être traité, la seule complexité venant de l'hétérogénéité des remblais constituant le terrain. La densité de sondages en investigation était de 1 pour 24 m², soit nettement plus que le 1 pour 100 m² recommandé, et le protocole de prélèvement y était homogène. De plus, une approche géostatistique a été utilisée pour estimer les volumes à excaver. On relève néanmoins des voies d'amélioration possibles à ce qui a été pratiqué sur le site de cette ancienne chaufferie :
 - Le nombre de prélèvements de sol sur la verticale était un peu faible (1 échantillon pour 1.4 m) par rapport au nombre identifié comme favorable dans le cadre de la présente étude (1 échantillon par mètre au minimum) ;
 - Le recouvrement homogène de la zone d'intérêt n'était pas assuré (zones lacunaires et sur-échantillonnées), un maillage régulier ou systématique aléatoire permettant de pallier cet inconvénient ;
 - Un échantillonnage systématique sur la verticale serait plus favorable que l'échantillonnage orienté qui a été pratiqué ;
 - Enfin, une utilisation appropriée des méthodes géostatistiques (application du seuil de dépollution à chaque simulation, puis calcul des probabilités de dépassement du seuil à partir de la distribution des volumes obtenue) permettrait de réduire les écarts entre estimation et résultat de dépollution.

UNE SITUATION MOINS CONTRASTEE : 76% D'ERREUR EN SUR-ESTIMATION

CARACTERISTIQUES

- Ancienne chaufferie
- Hydrocarbures pétroliers
- Remblais hétérogènes
- Traitement in situ + excavation

FACTEURS DETERMINANTS

FACTEURS FAVORABLES :

- Situation peu complexe
- Critères de qualité d'investigation :
 - Protocole homogène
 - 1 sondage pour 24 m²
- Estimation par méthode géostatistique

FACTEURS DEFAVORABLES :

- Critères de qualité d'investigation non remplis :
 - Zones sur-échantillonnées et lacunaires
 - Echantillonnage orienté sur la verticale
 - Densité faible de 1 échantillon pour 1.40 m
- Erreurs d'application de la géostatistique

- **La situation est également moins contrastée pour le cas B d'une ancienne usine de fabrication automobile, dépolluée hors site après excavation des terres. L'erreur d'estimation y est très faible (1% en très légère sous-estimation), bien que 3 des critères identifiés comme favorables à une réduction des écarts, et apparaissant en premier lieu particulièrement déterminants, ne soient pas remplis :** la densité

d'échantillonnage dans le plan (1 sondage pour 183 m²) et sur la verticale (1 échantillon pour 3 m), est plus faible que celle reconnue comme favorable à une diminution de l'erreur d'estimation, et l'estimation n'a pas été menée à l'aide de méthodes géostatistiques, mais par des méthodes déterministes. Mais on relève que ce cas est relativement simple dans la mesure où la dépollution concernait un unique type de polluants, des hydrocarbures lourds, dans un unique de terrain, des remblais. De plus, la répartition de la pollution a fait l'objet d'une interprétation minutieuse, en complétant la première estimation fournie par la méthode d'interpolation déterministe, par la connaissance détaillée du site de l'ingénieur de terrain. Ce cas semble témoigner que les recommandations relatives aux investigations issues de l'analyse statistique des cas peuvent être relaxées lorsque le cas est relativement simple, sans que cela ait des conséquences négatives sur l'erreur d'estimation. Elle prouve également que d'autres méthodes d'estimation que les méthodes géostatistiques peuvent être pertinentes, avec pour seul inconvénient par rapport à une approche géostatistique, l'impossibilité de quantifier de manière rigoureuse l'incertitude d'estimation.

- **Enfin, quelques sites présentent de faibles erreurs d'estimation, alors que les facteurs de succès ne sont majoritairement pas réunis.** Il s'agit à plusieurs reprises de situations où les résultats de dépollution ne sont pas fiables, selon les critères adoptés dans la présente étude. Le cas Q illustre cette situation. L'erreur d'estimation est de 5%, mais le résultat de dépollution est peu fiable car seuls des contrôles en bordure et fond de fouilles ont été réalisés.

6. Conclusion

Le projet présenté dans ce rapport avait pour but d'évaluer les méthodologies les plus pertinentes pour l'optimisation de la quantité de terres à dépolluer sur un site.

Pour ce faire, l'étude s'est appuyée sur deux sources d'information complémentaires :

- un questionnaire qualitatif qui a permis de recueillir la perception d'acteurs des sites et sols pollués par rapport aux incohérences entre diagnostics et dépollutions rencontrées dans le cadre de leur activité ;
- 23 fiches de cas qui ont été récoltées et analysées à partir de sites ayant été à la fois diagnostiqués et dépollués, et pour lesquels une réconciliation des deux phases a pu être menée.

Bien que ce matériel reste limité et qu'il ait été délicat d'en généraliser certaines conclusions, il a été source de nombreux enseignements. En outre, la convergence du questionnaire, des fiches de cas et d'un séminaire réunissant une quinzaine d'experts du domaine des sites et sols pollués apporte un crédit certain à ces enseignements.

On constate en premier lieu que les pratiques ont positivement évolué et que dans 75% des cas environ, les écarts entre diagnostic et dépollution sont acceptables pour les acteurs de la profession. 25% des cas conduisent pour autant à des écarts significatifs, supérieurs à 25-30% et pouvant même dépasser les 100%. Ces écarts découlent de plusieurs facteurs qui peuvent être hiérarchisés par ordre d'importance décroissante : complexité de la situation de pollution (nombre et type de polluants, historique du site, lithologie), conditions d'investigation (quantité / qualité), méthode d'estimation des quantités mise en œuvre, nature des contrôles lors de la dépollution. Ne pouvant avoir de prise sur la complexité de la situation, c'est donc bien en influant avant tout sur la qualité des conditions d'investigation que les donneurs d'ordre pourront apprécier avec fiabilité l'ampleur et la localisation des pollutions en place.

Ce travail a également mis en évidence la difficulté de comparer objectivement les résultats obtenus lors du diagnostic et en dépollution, qui s'explique par plusieurs raisons : différence de périmètre entre diagnostic et travaux, changement d'objectifs ou prise en compte de nouveaux polluants, nature et exhaustivité des contrôles réalisés en cours de dépollution, etc.

Ensuite, l'étude a permis d'élaborer des recommandations opérationnelles à plusieurs niveaux : conditions d'investigation, méthode d'estimation des volumes de terres / masses de polluants, nature des contrôles en cours de dépollution. S'agissant des méthodes d'estimation, l'étude souligne l'importance de choisir l'approche la plus adaptée à la fois à la complexité de la situation et au niveau de précision de la caractérisation mise en œuvre. La géostatistique apparaît comme l'approche donnant, lorsqu'elle est appliquée dans les règles de l'art et en complément d'un indispensable jugement d'expert, les prédictions de volumes / masses les plus fiables. Sa mise en œuvre ne se justifie pour autant pas forcément dans le cas de situations de pollution simples et correctement caractérisées, pour lesquelles un jugement d'expert peut déjà apporter à moindre coût une réponse suffisante. Il importe surtout de garder à l'esprit l'importance de ce jugement d'expert qui, dans tous les cas, doit compléter les outils mis en œuvre afin de valider la plausibilité de leurs résultats.

Finalement, mentionnons que les résultats obtenus dans le cadre du projet gagneraient à être régulièrement enrichis de nouveaux cas, fournissant ainsi une base de connaissance précieuse pour l'évolution des pratiques en caractérisation et dépollution des sites pollués en France.

Bibliographie

- [1] Note ministérielle Sites et sols pollués du 8 février 2007. *Modalités de gestion et de réaménagement des sites pollués*.
- [2] Colombano S., H.Leprond et D.Hube (2012) Le plan de gestion : des textes de 2007 à leur mise en œuvre, Présentation lors de la *Journée Technique n°7 d'information et de retour d'expérience de la gestion des sites et sols pollués*, Paris, 8 octobre 2012.
- [3] Blanc C., F. Lefevre, G. Boissard, M. Scamps et B. Hazebrouck (2012) *Guide de réutilisation hors site des terres excavées en technique routière et dans des projets d'aménagement*. BRGM/RP-60013-FR, 53 p.
- [4] Coussy S., L. Rouvreau, C. Blanc, M. Scamps et J. Windholtz (2013) *Guide de caractérisation des terres excavées dans le cadre de leur réutilisation hors site en technique routière et dans des projets d'aménagement*.
- [5] Chilès JP., Demougeot-Renard H., Fouquet de C., D'Or D., Garcia M., Le Loc'h G., Jeannée N., et Peraudin JJ. (2005) *Géostatistique appliquée aux sites et sols pollués. Manuel méthodologique et exemples d'application*, Manuel GeoSiPol.
- [6] RECORD (2013) *Retour d'expérience critique sur l'utilisation de méthodes géostatistiques pour la caractérisation des sites et sols pollués*, n°11-0514/1A, 135 p.
- [7] Demougeot-Renard H., Jeannée N., et Germain P. (2014) Pour une intégration raisonnée de la géostatistique lors de la caractérisation des sites et sols pollués. *Environnement & Technique*, N°336, Mai 2014, pp. 59-63.
- [8] UPDS (2014) *Rapport de synthèse des travaux du GT Pollution Concentrée*, Version décembre 2014, 79 p.
- [9] Matheron G. (1978) *Estimer et choisir*, Les cahiers du centre de Morphologie Mathématique de Fontainebleau, Fascicule 7, 175 p.

ANNEXES

Annexe A : Notions géostatistiques

L'annexe présente une synthèse des principaux concepts géostatistiques pertinents pour la caractérisation des sites et sols pollués. Une présentation plus approfondie de la démarche peut être trouvée dans les références suivantes :

- Chilès, J. P., Demougeot-Renard, H., de Fouquet, C., Garcia, M., Jeannée, N., G., L. L., & Peraudin, J. J. (2005) *Géostatistique appliquée aux sites et sols pollués. Manuel méthodologique et exemples d'application*, 139 pages.
- RECORD (2013) *Retour d'expérience critique sur l'utilisation de méthodes géostatistiques pour la caractérisation des sites et sols pollués*, 135 pages, n°11-0514/1A.

Les méthodes géostatistiques ont été développées dans les années cinquante pour les besoins de l'industrie minière. Leur formalisme a été mis en place une décennie plus tard à l'Ecole des Mines de Paris par le professeur G.Matheron, créateur puis directeur du Centre de Géostatistique en 1967. Les années suivantes ont connu le développement de diverses méthodes et l'élargissement des domaines d'application de la géostatistique. De nouveaux centres de recherche sont apparus, et la géostatistique est devenue un outil incontournable dans certains domaines tels que l'exploitation pétrolière ou minière. L'application de la géostatistique aux sites et sols pollués a été initiée il y a une vingtaine d'années avec de premiers travaux de recherche sur des cas de pollutions chimiques présentés dans le cadre de la conférence geoENV (international conference on geostatistics for environmental applications) au début des années 90'.

A.1 Principaux concepts et méthodes géostatistiques

La géostatistique désigne un ensemble de méthodes et un formalisme mathématique qui permettent de décrire quantitativement des phénomènes présentant une variabilité spatiale et/ou temporelle. Elle diffère de la statistique classique par le fait qu'elle prend en compte la localisation des données. Sur la base d'une étude des données disponibles de la variable d'intérêt, elle permet d'en estimer les valeurs en tout point du domaine d'étude, là où on ne dispose d'aucune information. Elle permet en outre de fournir une estimation de l'incertitude de la valeur estimée en chaque point (Figure 3).

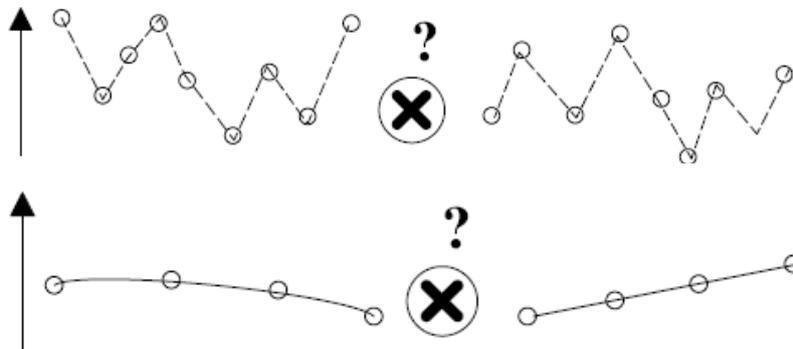


Figure 3 : Quelle estimation en un point à partir des données voisines ? Et quelle incertitude associée ? Dans les deux cas présentés, l'estimation pourra être la même ; en revanche l'incertitude associée sera différente car la continuité spatiale n'est pas identique.

A.1.1 Analyse exploratoire et variographique

La première étape après la collecte des données consiste à en réaliser une analyse exploratoire permettant le **contrôle qualité** de ces données, leur validation ainsi qu'une première interprétation des niveaux de pollution. Différents outils sont disponibles à cet effet: plans de position, histogrammes, statistiques classiques, nuages de corrélation, variogrammes, etc. Les principaux outils permettant d'étudier les variables prises individuellement sont présentés ci-dessous.

- Plan de position

Il permet de représenter l'emplacement des mesures sur le site et souvent de détecter la présence de coordonnées aberrantes pour certains échantillons/sondages ; utilisé avec une échelle de couleurs, il fournit déjà une première appréciation des zones présentant des valeurs élevées pour la contamination considérée ainsi que le repérage d'éventuelles valeurs anormales.

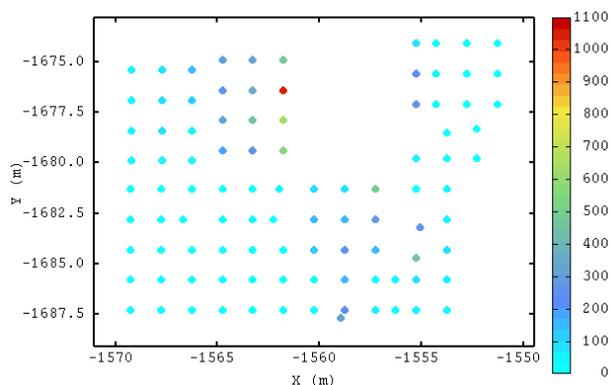


Figure 4 : Plan de position de données associé à une échelle de couleurs.

- Histogramme et statistiques classiques

En général associé à des statistiques classiques telles que le minimum, le maximum, la moyenne, l'écart-type, la médiane et quelques quantiles, l'**histogramme** permet d'apprécier la distribution des données : présence de valeurs extrêmes, dissymétrie avec beaucoup de valeurs faibles et peu de valeurs fortes par exemple, mais aussi bimodalité pouvant révéler la présence de plusieurs populations distinctes...

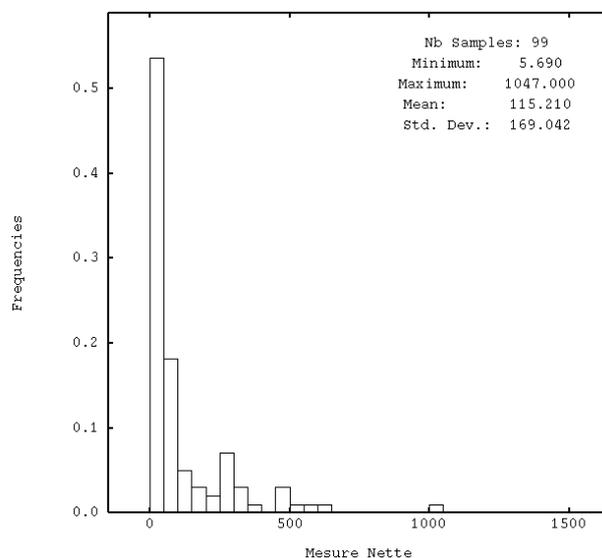


Figure 5 : Histogramme et statistiques typiques de données de pollution.

- Analyse variographique

L'intérêt de la géostatistique consiste en particulier à prendre en compte la continuité (structure) spatiale de la variable que l'on souhaite cartographier. Les situations sont très diverses : la dissémination aérienne de poussières à partir d'une cheminée induira probablement un phénomène de contamination des sols très continu, avec une décroissance régulière de la pollution dans la direction principale des vents. Une contamination peu mobile inhérente à des remblais déposés sans logique sur un site risque fort d'être très peu continue, des matériaux contaminés pouvant côtoyer des matériaux sains sans que cela soit prévisible.

Cette continuité spatiale est appréhendée par le **variogramme**, d'abord calculé expérimentalement puis modélisé.

Le variogramme expérimental est construit à partir de la **nuée variographique**, qui représente, pour chaque couple de mesures, le demi-écart au carré de la différence des valeurs en fonction de la distance entre les points de mesure.

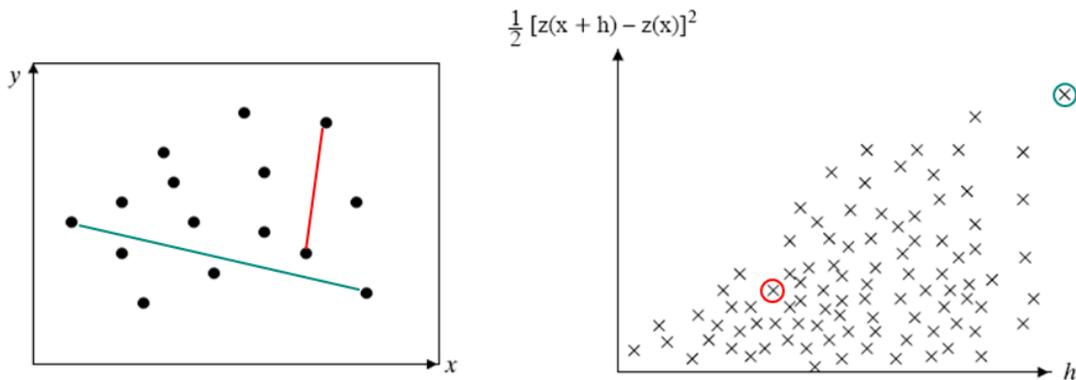


Figure 6 : Plan de position et nuée variographique avec mise en évidence de deux paires de points.

Le variogramme expérimental est alors obtenu en moyennant, par classe de distance sur la nuée variographique, la contribution apportée en termes de variabilité par l'ensemble des couples de mesure. Une tolérance de calcul sur la distance est utilisée pour permettre la construction du variogramme expérimental :

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{x_j - x_i \sim h} [z_j(x+h) - z_i(x)]^2$$

h représente la distance de calcul du variogramme, z_i et z_j les valeurs de la variable et $N(h)$ représente le nombre de couples distincts de points tels que $x_j - x_i \sim h$.

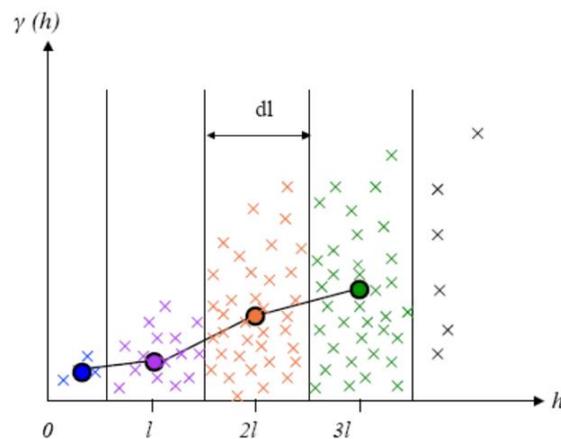


Figure 7 : Construction du variogramme expérimental à partir de la nuée variographique.

En présence d'un phénomène structuré (continu), la variabilité spatiale augmente avec la distance et tend à se stabiliser à partir d'une distance appelée « distance de corrélation maximale » ou **portée**. Les mesures séparées par une distance supérieure ne présentent plus de corrélation spatiale.

Le variogramme expérimental est donc calculé pour des distances multiples du pas de calcul et est seulement connu de manière discrète. Afin de connaître la variabilité quelle que soit la distance et la direction (en cas d'anisotropie) considérées, il est nécessaire de trouver un modèle théorique de variogramme qui, tout en respectant certaines conditions mathématiques, ajuste de manière satisfaisante le variogramme expérimental.

Il est alors important d'adopter un principe d'économie en recherchant le modèle le plus simple possible respectant l'interprétation de la structure spatiale.

D'autre part, deux caractéristiques importantes d'un variogramme doivent être identifiées :

- Le **comportement à l'origine** traduit le degré de régularité de la régionalisation. Il peut être discontinu (effet de pépite), linéaire (phénomènes continus mais non dérivables) ou parabolique (phénomènes très réguliers). La modélisation de la structure spatiale pour les petites distances étant prépondérante dans les calculs d'estimation qui vont suivre, il est important de caler la modélisation au plus près des premiers points du variogramme expérimental.

- La présence d'un **palier**, valeur de la variabilité si elle se stabilise à partir d'une certaine distance appelée portée, est synonyme de stationnarité d'ordre 2 et représente la distance maximale de corrélation.

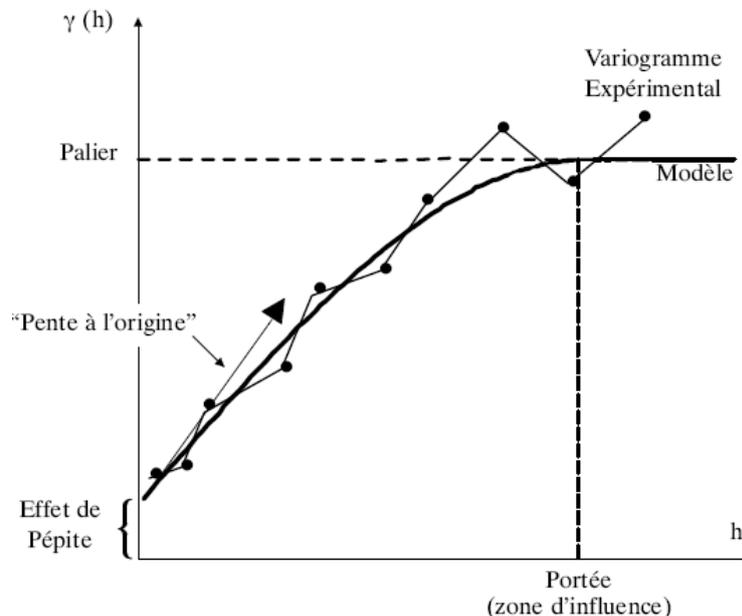


Figure 8 : Variogramme expérimental (points) et modélisation de la structure spatiale (trait épais).

La modélisation d'un variogramme expérimental nécessite souvent l'utilisation conjointe de plusieurs composantes : on parle de **structures gigognes** qui sont la combinaison de plusieurs schémas élémentaires. Souvent, les différentes structures ont une signification physique. Une discontinuité importante à l'origine, du fait d'une forte variabilité à petite distance, peut provenir d'erreurs de mesure ou de positionnement, voire d'une microstructure non captée par la maille d'échantillonnage. Des portées différentes correspondent souvent à des comportements physiques à des échelles différentes.

En pratique, cette décomposition, et donc la modélisation du variogramme expérimental, n'est pas unique : plusieurs modèles peuvent être acceptables. Il faut donc employer à bon escient le principe d'économie en essayant de ne pas complexifier à outrance la modélisation du variogramme, tout en gardant une interprétation cohérente et compatible avec l'information disponible.

De plus, la présence de distributions très dissymétriques pour les teneurs (majorité de valeurs très faibles, voire inférieures à la limite de détection, et quelques valeurs élevées) peut rendre délicate l'identification de la structure spatiale du phénomène, i.e. l'analyse variographique. Dans pareil cas, il est fréquent de recourir à une transformation préliminaire des données, par exemple logarithmique, afin d'atténuer le poids des quelques valeurs fortes dans l'analyse.

A.1.2 Cartographie par krigeage

Une fois l'analyse exploratoire menée jusqu'à l'obtention d'un modèle de variogramme, une cartographie par **krigeage** de la variable d'intérêt peut être réalisée. L'interpolation par krigeage en un point x_0 , notée $\hat{z}(x_0)$, est obtenue par une combinaison linéaire pondérée des n données mesurées aux points x_i :

$$\hat{z}(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i)$$

Le krigeage se différencie uniquement des autres interpolateurs classiques (p.ex. méthode d'inverse des distances) dans le choix des coefficients λ_i , appelés poids de krigeage, qui dépendent :

- des distances entre les données et la cible x_0 (tout comme les interpolateurs classiques),
- des distances séparant les données entre elles (prenant en compte d'éventuels regroupements),
- de la structure spatiale du phénomène.

La résolution du système de krigeage permet de trouver ces poids tout en :

- garantissant le non-biais de l'estimation,
- minimisant la variance de l'erreur d'estimation $Var[Z - \hat{Z}]$, ce qui revient intuitivement à minimiser le risque d'erreur.

En ce sens, le krigeage constitue le **meilleur estimateur linéaire sans biais**.

En chaque point du domaine de modélisation, l'estimation par krigeage est accompagnée d'une quantification de l'incertitude associée, appelée variance de l'erreur de krigeage. Elle est nulle si l'estimation est réalisée sur un point de donnée et augmente à mesure que l'on s'éloigne des données, indiquant une plus grande incertitude dans la valeur estimée.

Cette variance (ou écart-type) de krigeage décrit l'incertitude qui découle de la variabilité spatiale du phénomène. Il importe de garder à l'esprit que cet écart-type peut s'avérer notablement inférieur à l'écart-type de reproductibilité analytique. En effet, dans le cas recommandé où l'ensemble des échantillons est analysé par un unique laboratoire, la part de variance liée à une mauvaise reproductibilité (écarts observés sur un même échantillon par des laboratoires différents) ne peut être évaluée. Par contre, une mauvaise répétabilité (écarts observés sur un même échantillon par le même laboratoire) pourra conduire à l'observation d'un effet de pépite lors du calcul du variogramme expérimental.

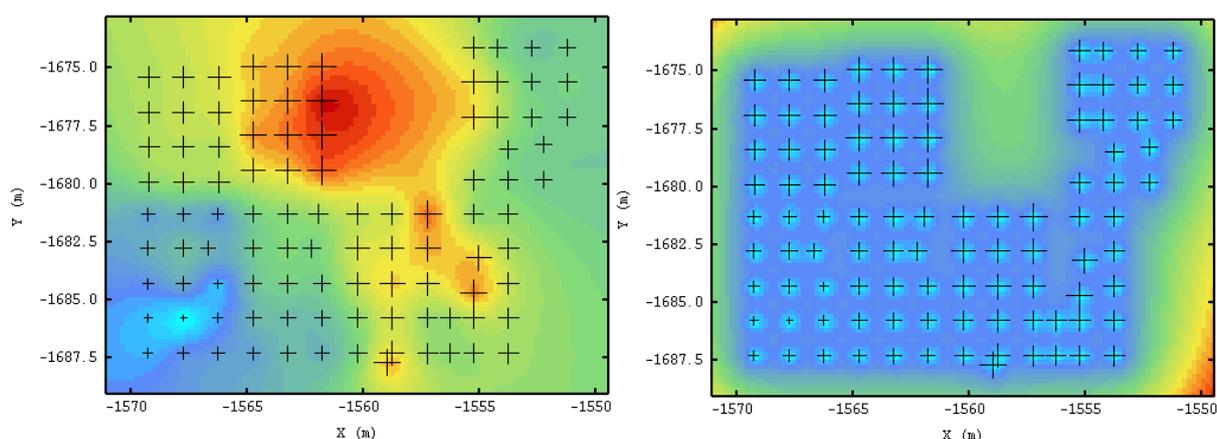


Figure 9 : Cartographie par krigeage et écart-type d'erreur de krigeage associé.

Dans la pratique, l'estimation en un point donné peut être réalisée à partir de tous les points disponibles (voisinage unique) ou uniquement à partir des points situés dans un certain voisinage du point cible (voisinage glissant) pour limiter les lourdeurs calculatoires mais sans effet néfaste sur la cartographie finale (le poids de krigeage attribué à des données très éloignées du point cible tend vers 0).

A.1.3 Analyse de risque

- Limites du krigeage

Par construction, le krigeage est un interpolateur qui ne reproduit pas la variabilité réelle d'un phénomène (effet de « lissage »). En effet, le krigeage vise à minimiser le risque d'erreur en chaque point et ne peut donc en même temps reproduire la variabilité réelle.

Or dans la pratique et dans les cadres réglementaires actuels, la prise de décision sur site pollué repose sur une analyse de risque, au niveau local ou global. Il s'agit alors de déterminer les secteurs présentant des dépassements de valeurs de référence (seuils), et il s'avère essentiel dans ce cas de reproduire la variabilité du phénomène. L'application de seuils à des images « lissées » de la réalité conduirait en effet à sur- ou sous-estimer l'ampleur des secteurs contaminés, et par suite les surfaces, volumes ou masses de matériaux associés.

- Simulations géostatistiques

La géostatistique fournit une réponse cohérente aux questions qui font appel à des opérateurs non linéaires comme l'application d'un seuil ou le calcul d'un volume exposé à un dépassement de ce seuil. Parmi les méthodes utilisables, les **simulations** sont les plus souples. Elles donnent la

possibilité de simuler en chaque point de l'espace un scénario pour la variable étudiée de telle façon que la distribution statistique de la variable, mise en évidence par l'histogramme, et les caractéristiques de la variabilité spatiale, au travers du variogramme, soient reproduites. Une simulation est ainsi une image possible du phénomène là où le krigeage s'intéresse à fournir l'image la plus probable. Le krigeage lisse ainsi le phénomène étudié tandis qu'une simulation en reproduit toute la variabilité. La simulation est, par ailleurs, dite **conditionnelle** lorsqu'elle est calée aux données et retrouve les valeurs des mesures en ces points.

De nombreuses techniques de simulation ont été développées ; la plupart d'entre elles travaillent dans un cadre gaussien. Cette hypothèse étant rarement observée en pratique, on réalise au préalable une transformation de la variable étudiée en une variable gaussienne par une fonction de transformation, telle que l'anamorphose. Ce qui revient intuitivement à déformer l'histogramme de départ en un histogramme gaussien. Les simulations sont alors réalisées sur cette transformée gaussienne, les simulations finales des teneurs étant déduites des simulations gaussiennes par application de la fonction de transformation inverse (anamorphose inverse).

- Estimations globales

Les simulations apportent une information très riche et permettent de calculer des grandeurs globales comme le volume total dépassant un certain seuil en calculant ce volume pour chaque simulation puis en estimant les caractéristiques statistiques de la distribution de volumes équiprobables obtenue (post-traitement) : moyenne, médiane, variance, intervalle de confiance.

De cette façon, la Figure 10 illustre le post-traitement de surfaces dont les concentrations en polluant dépassent un seuil donné. Sur cet exemple, il est raisonnable de s'attendre à traiter environ 99 m² (valeur médiane) de surface dépassant le seuil considéré avec un intervalle de confiance à 90 % compris entre 80 et 116 m².

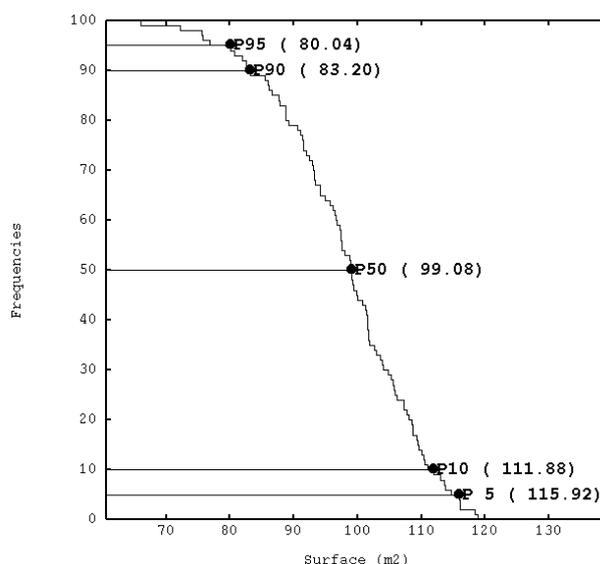


Figure 10 : Post-traitement des surfaces dont les concentrations en polluant dépassent un seuil donné (histogramme cumulé inverse). Indication de quelques quantiles particuliers.

- Analyses locales, probabilités de dépassement de seuil

L'intérêt des simulations réside dans le fait de calculer un grand nombre de scénarios, permettant ainsi un raisonnement en probabilités. En chaque point cible ou pour chaque maille d'estimation, on a ainsi un histogramme des valeurs possibles (équi-probables), dont la moyenne converge vers le krigeage. En calculant point à point la proportion de réalisations dépassant l'objectif de qualité, on obtient une carte d'estimation de la probabilité de dépassement de ce seuil.

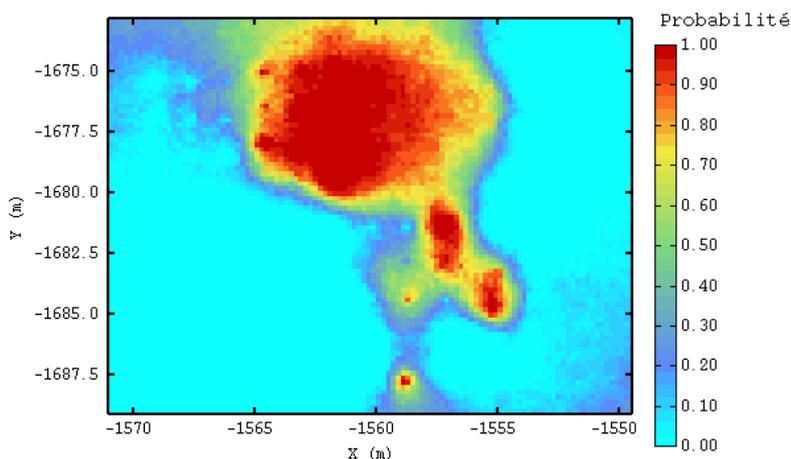


Figure 11 : Carte de probabilité de dépassement de seuil.

D'autres cartes peuvent être utiles au projet d'assainissement :

- Cartes de quantiles p qui représentent les valeurs telles que les vraies valeurs ont $p\%$ de chance d'être plus faibles ;
- Cartes d'intervalles de confiance qui représentent la largeur d'un intervalle compris entre deux quantiles.

Notons que ces cartes de quantiles apportent une réponse à certaines contraintes transcrites dans le droit de l'environnement, notamment concernant la gestion du percentile à 95%.

L'utilisation des simulations permet donc de décider des zones à assainir en fonction des seuils retenus et des niveaux de confiance souhaités, d'estimer les quantités de terre à excaver ou à traiter, et donc de prévoir la durée, le coût et la logistique associés.

Ces deux types de résultats, analyses locales et estimations globales, sont complémentaires et interviennent respectivement pour localiser les zones contaminées à excaver ou à traiter, et pour obtenir des quantifications d'un point de vue global pour la prise de décision en amont des travaux.

Remarque : Contrairement aux estimations globales, les estimations locales peuvent être directement obtenues à partir des propriétés théoriques de la distribution gaussienne par la méthode de l'espérance conditionnelle et donc sans passer par la mise en œuvre de simulations.

- Support de mesure, d'estimation, d'excavation...

Tout au long de la phase de modélisation des concentrations, une attention particulière doit être portée à la question du **support**. Celui-ci caractérise le volume que l'on considère, aussi bien au moment de l'échantillonnage qu'au moment des cartographies ou du traitement des terres.

Au moment de l'échantillonnage, il faut veiller à ce que le volume de prélèvement soit le plus homogène possible pour l'ensemble des échantillons. Lorsque des volumes différents ont été utilisés, au cours de campagnes différentes par exemple, le traitement conjoint des différents types d'échantillons ne peut pas être réalisé directement.

La question du support devient cruciale lors de l'estimation de volumes de terres polluées. Selon le support choisi (taille de la maille de traitement), le volume de terres excédant un seuil varie comme illustré ci-dessous (**effet de support**). Ainsi, la maille considérée dans l'analyse géostatistique doit être en accord avec la maille choisie pour le traitement des terres.

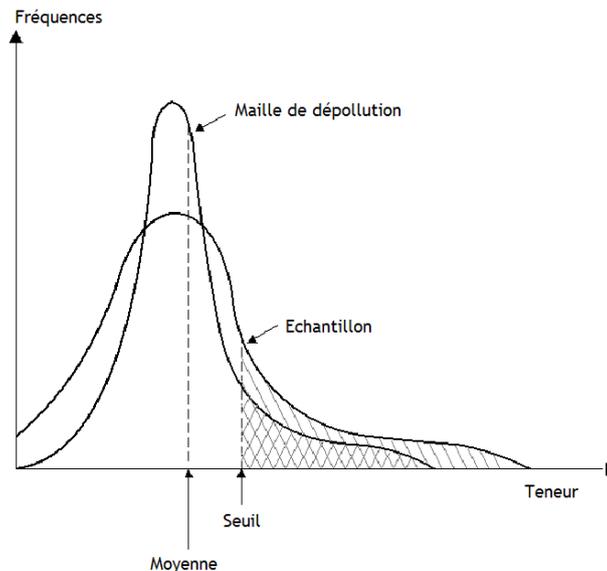


Figure 12 : L'effet de support : variation du volume excédant un seuil en fonction de la maille considérée.

Lorsque l'on réalise des cartes de probabilité de dépassement de seuil, il est également important de prendre en compte ce support puisque la variabilité et donc la probabilité de dépassement de seuil changent avec le support d'estimation.

- Sensibilité du modèle géostatistique aux paramètres

Qu'il vise à l'obtention d'une cartographie par krigeage ou à la réalisation de simulations en vue d'une analyse de risque, le modèle géostatistique repose sur le choix de certains paramètres clés, qui sont estimés à partir d'une connaissance parcellaire de la pollution. Le choix du modèle de variogramme est le plus important, même si en pratique le choix du voisinage d'estimation peut également jouer un rôle sur la qualité des résultats. Comment s'assurer que ces paramètres sont « bien » choisis ?

Il importe tout d'abord de s'assurer, avant tout calcul de variogramme, que l'on dispose de « suffisamment » de mesures, dans la pratique plus d'une vingtaine. En deçà de ce nombre, le risque de fluctuations associées à l'estimation du variogramme est trop important. Le krigeage comme les simulations sont particulièrement sensibles au choix du modèle de variogramme aux petites distances : effet de pépite ou non, régularité du variogramme à l'origine. Au-delà de l'information apportée par les mesures, la connaissance a priori du phénomène et de son hétérogénéité peuvent aider au choix de ce modèle de variogramme. En cas de doute entre plusieurs modèles de variogrammes, il est alors recommandé de tester ces derniers. Plusieurs méthodes sont alors possibles : tout d'abord, la **validation croisée** consiste à retirer une à une chaque donnée et à la ré-estimer à partir des N-1 données restantes. Répétée pour chaque modèle de variogramme, la validation croisée permet d'évaluer si un des modèles retrouve mieux lors de l'estimation les valeurs mesurées. Il est également conseillé d'observer l'impact pratique du choix du modèle sur l'estimation par krigeage et l'incertitude associée afin d'en évaluer la sensibilité.

Ces éléments permettent de réduire dans la pratique, les risques liés à un choix de paramètres géostatistiques inappropriés.

A.2 Quels outils pour quels objectifs ?

Deux grands types de méthodes géostatistiques ont été présentés au paragraphe précédent : le krigeage et les simulations. De nombreuses variantes de ces méthodes sont disponibles à l'heure actuelle et répondent aux diverses situations rencontrées dans les domaines d'application. Des développements méthodologiques sont également encore en cours.

De son côté, la caractérisation des sites et sols pollués, nécessaire à leur gestion dans des contextes multiples (pollution accidentelle, cession-acquisition d'un site, gestion/orientation de déblais en vue d'un projet immobilier, démantèlement d'une installation nucléaire, prévision de dragage d'une rivière ou d'un port afin d'y restaurer de bonnes conditions de navigation) poursuit divers objectifs.

- Optimisation d'une stratégie d'échantillonnage : comment atteindre un niveau de connaissance suffisant, par rapport à un objectif d'étude, avec un minimum de données positionnées au mieux ?

- Levée de doute (identification de sources, de points chauds,...) ;
- Compréhension de la pollution et de sa répartition spatiale grâce à l'analyse exploratoire des données et aux cartographies ;
- Évaluation de la compatibilité des terres avec l'usage futur du site ;
- Calcul de volumes, masses ou surfaces contaminées au-delà d'un seuil ;
- Orientation de l'excavation ou du traitement des terres et des matériaux (ex. béton) contaminés ;

Ces objectifs permettent eux-mêmes de répondre à des objectifs plus généraux tels que la description de bruits de fond, la contractualisation d'engagements respectifs des parties prenantes ou bien encore, in fine, l'estimation du risque sanitaire.

Se pose alors la question de l'intérêt de la géostatistique en appui à la réalisation de ces tâches, et le cas échéant des méthodes les plus appropriées. Ce sujet est discuté dans les lignes suivantes pour chacun de ces objectifs de caractérisation.

Notons que, pour plusieurs de ces thèmes, les fiches recto-verso contenues dans le manuel méthodologique de l'association GeoSiPol (2005) présentent à la fois les pratiques actuelles ainsi que les apports attendus de la méthodologie géostatistique.

A.2.1 Optimisation d'une stratégie d'échantillonnage

La **stratégie d'échantillonnage**, c'est-à-dire le nombre, la localisation, le phasage et les conditions de prélèvement d'échantillons des milieux à caractériser est une question cruciale se posant à plusieurs reprises en cours d'évaluation de site.

Toute campagne d'échantillonnage 1) répond à des objectifs d'étude précis (quels prélèvements pour quels résultats ?) qui doivent être exprimés le plus clairement possible, et 2) est mise en œuvre sous diverses contraintes (temps, coût, technique...). La stratégie retenue constitue donc généralement un compromis entre contraintes et objectifs.

On regroupe généralement les différentes stratégies en deux grandes familles :

- Les échantillonnages probabilistes : fondés sur des considérations statistiques de l'échantillonnage, ils permettent ensuite des inférences statistiques sur l'ensemble du site à partir des données ;
- Les échantillonnages préférentiels : mettant en jeu l'expertise des praticiens, ils nécessitent des connaissances préalables de la zone à investiguer, et le traitement statistique ou géostatistique des données récoltées est ensuite plus délicat.

Quelle que soit la stratégie d'échantillonnage adoptée, les données collectées pourront faire l'objet d'une étude géostatistique. Certaines configurations nécessiteront parfois des traitements particuliers (ex. dégroupement en cas de resserrements locaux de données, pour réduire le biais sur les statistiques). D'autres permettront de réduire plus facilement l'incertitude d'estimation. Il est également possible de rationaliser, voire d'optimiser les échantillonnages en s'appuyant sur des outils géostatistiques. La géostatistique fournit en effet plusieurs outils aidant à la définition d'échantillonnages complémentaires, tels que :

- La carte de variance de krigeage qui fait ressortir les zones dans lesquelles l'incertitude associée à l'estimation est la plus importante et où de nouveaux échantillons pourraient être collectés.
- La carte de probabilité de dépassement de seuil qui, elle, met en évidence les zones pour lesquelles la prise de décision par rapport à un seuil donné est assortie d'une forte incertitude. Ainsi il devient intéressant de procéder à un échantillonnage complémentaire dans les zones où le risque de dépassement du seuil est intermédiaire.

A.2.2 Levée de doute

Lors de la phase initiale de caractérisation, une **levée de doute** permet d'évaluer rapidement la présence ou non d'une contamination, d'identifier les sources et de quantifier sommairement le risque encouru.

Pour réaliser cette levée de doute, un échantillonnage non probabiliste est en général choisi et quelques mesures ou prélèvements sont positionnés par jugement.

A ce stade, une modélisation géostatistique n'est que rarement utile, le résultat analytique ayant pour objectif de valider ou d'infirmer la suspicion de pollution.

A.2.3 Cartographie de la contamination afin de comprendre la répartition spatiale de la pollution

Dans le but de **comprendre** la répartition et l'extension spatiale de la pollution, des **cartographies de contamination** sont réalisées.

Pour les réaliser, il est important de définir une stratégie d'échantillonnage adaptée, puis les données sont analysées d'un point de vue statistique et géostatistique (analyse exploratoire et variographique).

En fonction des données disponibles et de la continuité spatiale de la contamination, l'interpolation peut ensuite être réalisée en réalisant un krigeage ou un cokrigeage (cas multivariable). Les estimations géostatistiques sont associées à des cartographies d'incertitudes, permettant d'apprécier la confiance que l'on a concernant les cartes obtenues.

A.2.4 Évaluation de la compatibilité des terres avec les usages futurs (analyse de risques)

Afin d'évaluer la **compatibilité des terres avec les usages futurs** du site, une analyse de risque doit être réalisée. En plus des cartographies de contamination qui permettent de comprendre la répartition de la pollution, des outils d'aide à la décision sont nécessaires.

Le recours à des simulations géostatistiques est alors courant et permet par exemple l'obtention de cartes de probabilité de dépassement de seuil, aidant à distinguer les zones présentant un risque acceptable sans mesures particulières, des zones qui devront être traitées ou excavées.

A.2.5 Calcul de volumes, de masses ou de surfaces contaminées

Si l'on souhaite connaître le volume ou la masse d'un polluant dépassant une certaine teneur globalement sur un site, les **simulations géostatistiques** constituent à ce jour le seul outil opérationnel. Elles permettent par exemple d'estimer un volume probable assorti d'un intervalle de confiance. Ainsi, de nouveau, toutes les incertitudes sont quantifiées, aidant à planifier au mieux les phases de chantier, aussi bien en termes de coût que de délais.

A.2.6 Orientation de l'excavation ou du traitement des matériaux solides

Lors des phases de chantier, les outils géostatistiques peuvent également être mis à profit. Ainsi, en ayant pris en compte la maille (support) d'excavation des matériaux et après avoir choisi un risque acceptable, des cartes de probabilité de dépassement peuvent être calculées pour différents seuils afin de faire apparaître pour chaque maille la classe à laquelle celle-ci appartient, correspondant à des filières de dépollution/valorisation/mise en décharge.

Dans le cas de fortes incertitudes, les cartes de probabilité de dépassement sont également utilisées pour souligner les zones dans lesquelles l'incertitude est plus grande vis-à-vis d'un seuil fixé et où d'éventuels tris en cours de dépollution gagneront à être mis en œuvre.

A.2.7 Evaluation de la pollution résiduelle

Une fois la dépollution réalisée, il est possible d'utiliser le modèle géostatistique pour évaluer l'importance de la pollution résiduelle laissée en place, ainsi que l'incertitude associée. Ces éléments peuvent venir documenter une analyse des risques résiduels.

Annexe B : Fiches de cas

Préliminaire : Abréviations utilisées dans les fiches

Abréviations

AMO	assistance à maître d'ouvrage
BAP	benzo(a)pyrène
BE, B.E.	bureau d'étude
CCTP	cahier des clauses techniques particulières
CET2	centre enfouissement technique de déchets de classe 2
COHV	composés organiques halogénés volatils
COV	composés organiques volatils
CV	chlorure de vinyle
cis12DCE	cis-1,2-dichloréthylène
DO, D.O.	Donneur d'ordre
EM	mesures géophysiques électromagnétiques
ESR	évaluation simplifiée des risques
HAP	hydrocarbures aromatiques polycycliques
HCT	Indice hydrocarbures totaux (C10-C40)
ISDD	installation de stockage de déchets inertes
ISDND	centre de stockage de déchets ultimes
MO	maître d'ouvrage
PCE	perchloréthylène
PID	détecteur de photoionisation
TCE	trichloréthylène
VDSS	valeur de définition de la source sol
VME	valeur (limite) moyenne d'exposition aux postes de travail

Site A - Ancienne blanchisserie – PCE – Excavation et venting

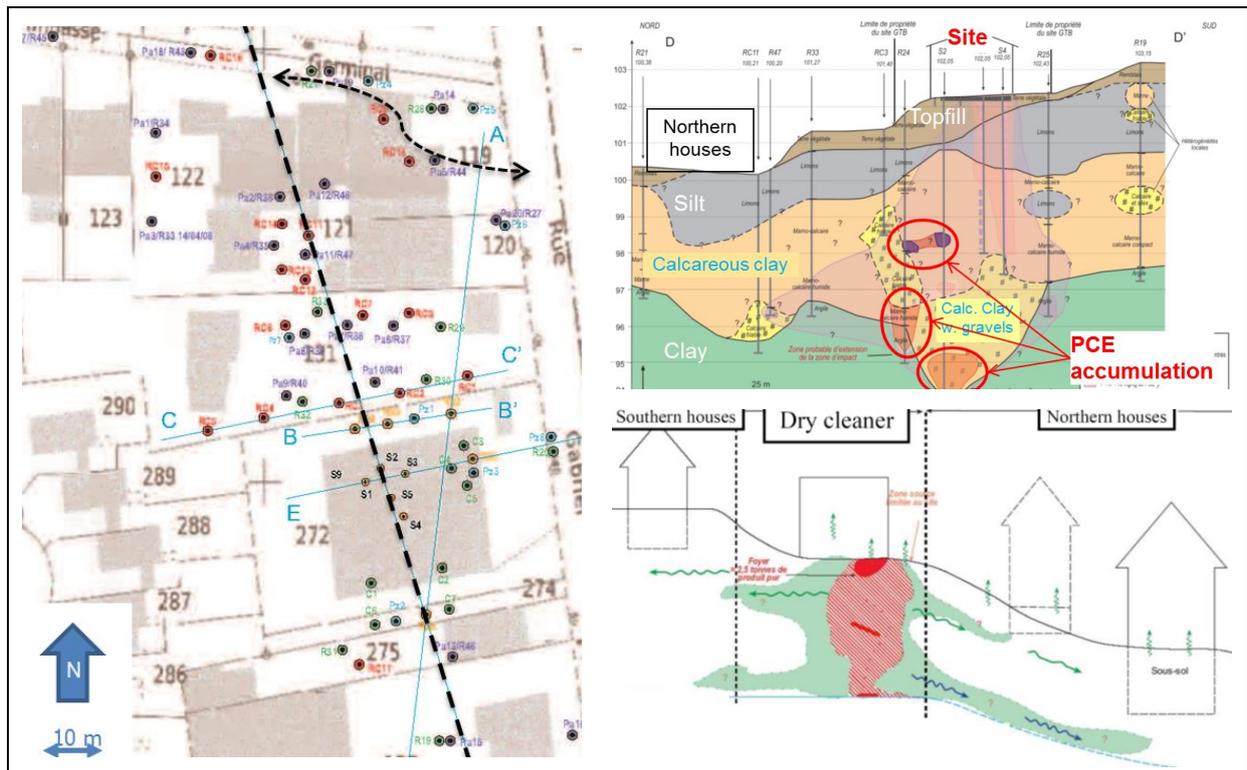


Figure 1 Plan de localisation des sondages réalisés en diagnostic (gauche), profil géologique (haut droite) et schéma conceptuel (bas droite) de l'ancienne blanchisserie implantée en Région parisienne.

Caractéristiques générales		
Activité(s) à l'origine de la pollution Période(s) d'activité	Activité de nettoyage à sec	
Période(s) et durée(s) d'activité	1983 – 2004 (21 ans)	
Surface du site (parcelle)	1200 m ²	
Types de substances justifiant une dépollution	Hydrocarbures chlorés (PCE principalement)	
Gammas de concentrations par milieu atteint (sol, eau souterraine, eau surface, air intérieur, sédiments,...)	PCE dans les sols en mg/kg ms	
	Nombre	320
	Minimum	0.06
	Moyenne	4.16
	Médiane	3.50
Maximum	434011.00	
Types de terrains atteints par la pollution	Terrains calcaires et marne-calcaires	
Caractéristiques de la (des) nappe (s) atteinte (s) par la pollution	Accumulation d'eau sur le toit de l'aquiclude marneux, entre 7 et 8 m de profondeur	
Occupation du site et de ses environs	Site en zone urbaine, entouré de petits pavillons et immeubles. Il comportait un seul bâtiment, occupant les deux tiers de sa	

	surface, mais celui-ci a été démoli en 2008.
--	--

<i>Etudes et travaux réalisés sur le site pollué</i>	
2001	Teneurs anormales mesurées par l'Agence Régionale de la Santé dans l'air des caves et lieux de vie des pavillons voisins du site
2004	Diagnostic mettant en évidence des teneurs anormales en PCE, trichloréthylène (TCE), cis-1,2-Dichloréthylène (cis12DCE) et chlorure de vinyle (CV) dans les sols entre 0 et 1 m de profondeur, et dans les eaux souterraines
2006 - 2011	Diagnostiques complémentaires pour délimiter la source de pollution et son panache dans- et à l'extérieur- du site Evaluation quantitative des risques sanitaires Plan de gestion
2012 - 2013	Dépollution par venting et excavation des terres sous tente
> 2014	Surveillance après dépollution

<i>Caractéristiques de la dépollution</i>	
Type(s) de dépollution	In situ par venting + Hors site par excavation des terres
Technique(s) de dépollution	1) Venting sur site et hors site 2) Excavation des terres sous tente, malaxage et dégazage, puis réintégration dans la fouille 3) Venting final in situ
Description détaillée des objectifs fixés à la dépollution	Dépollution de la zone source (~ 800 m² x 8 m) Teneurs en PCE < 25 mg/kg ms dans les sols

<i>Estimations des quantités et localisation de la pollution en diagnostic</i>									
Type de méthode d'estimation utilisée	Géostatistique (Figure 2)								
Méthode précise d'estimation	Simulations conditionnelles des teneurs en PCE dans les sols (échantillons standards et méthanol)								
Dimension	3D								
Spécificités des données utilisées	<table border="1"> <tr> <td>Nombre</td> <td>214</td> </tr> <tr> <td>Types</td> <td>Analyses labo du PCE dans les sols</td> </tr> <tr> <td>Support</td> <td>Echantillonnage discriminé sur 10cm de carotte, après sélection au PID. Echantillonnage orienté sur très fortes et sur très faibles valeurs PID</td> </tr> <tr> <td>Répartition dans l'espace</td> <td>Répartition irrégulière des sondages dans la parcelle concernée par le site et son voisinage. Echantillons prélevés jusqu'à 10 m de profondeur, sur la base de mesures au PID : - 1 ou plusieurs échantillons prélevés</td> </tr> </table>	Nombre	214	Types	Analyses labo du PCE dans les sols	Support	Echantillonnage discriminé sur 10cm de carotte, après sélection au PID. Echantillonnage orienté sur très fortes et sur très faibles valeurs PID	Répartition dans l'espace	Répartition irrégulière des sondages dans la parcelle concernée par le site et son voisinage. Echantillons prélevés jusqu'à 10 m de profondeur, sur la base de mesures au PID : - 1 ou plusieurs échantillons prélevés
Nombre	214								
Types	Analyses labo du PCE dans les sols								
Support	Echantillonnage discriminé sur 10cm de carotte, après sélection au PID. Echantillonnage orienté sur très fortes et sur très faibles valeurs PID								
Répartition dans l'espace	Répartition irrégulière des sondages dans la parcelle concernée par le site et son voisinage. Echantillons prélevés jusqu'à 10 m de profondeur, sur la base de mesures au PID : - 1 ou plusieurs échantillons prélevés								

			<p>dans les zones de fortes valeurs au PID</p> <p>- 2 échantillons, au-dessus et au-dessous de la zone identifiée comme polluée au PID, pour « borner » la zone polluée.</p> <p>Echantillons plus nombreux à faible profondeur (< 5 m).</p>								
Données indirectes utilisées dans l'estimation ?	Non	Des mesures au PID ont été prises systématiquement sur la verticale en chaque sondage, et ont servi à délimiter la/les zones polluées.									
Densité des données utilisées	<p>1 donnée directe PCE pour 3.75 m²</p> <p>1 donnée directe PCE pour 30 m³</p>										
Points à vérifier (infos internes à GV-eOde)	<table border="1"> <tr> <td>Y a-t' il eu transformation/back-transformation des données en distribution gaussienne ?</td> <td>Oui</td> </tr> <tr> <td>Dégroupement réalisé en cas de clusters ?</td> <td>Non</td> </tr> <tr> <td>Vérifier si un changement de support diag-dépol a été modélisé.</td> <td>Non</td> </tr> <tr> <td>En cas d'excavation des sols, un facteur de foisonnement des sols a-t' il été appliqué dans l'estimation ?</td> <td></td> </tr> </table>			Y a-t' il eu transformation/back-transformation des données en distribution gaussienne ?	Oui	Dégroupement réalisé en cas de clusters ?	Non	Vérifier si un changement de support diag-dépol a été modélisé.	Non	En cas d'excavation des sols, un facteur de foisonnement des sols a-t' il été appliqué dans l'estimation ?	
Y a-t' il eu transformation/back-transformation des données en distribution gaussienne ?	Oui										
Dégroupement réalisé en cas de clusters ?	Non										
Vérifier si un changement de support diag-dépol a été modélisé.	Non										
En cas d'excavation des sols, un facteur de foisonnement des sols a-t' il été appliqué dans l'estimation ?											

Estimations des quantités et localisation de la pollution en dépollution

Méthode d'estimation utilisée	Bilan de masse de polluants extraits dans les phases de venting														
Spécificités des données utilisées	<table border="1"> <tr> <td>Nombre</td> <td colspan="2"><u>Contrôle du venting :</u> 2 PID posés aux entrées-sorties des bacs à charbon actif + Analyses de l'air pour corréler les valeurs PID (facteur calculé par analyse air x débit x durée)</td> </tr> <tr> <td>Types</td> <td colspan="2"> <u>Contrôle du venting :</u> Gaz extrait des aiguilles de venting (concentrations et débits hebdomadaires à journaliers) <u>Contrôle de l'excavation :</u> Teneurs mesurées dans les lots de matériaux excavés et traités, avant remblaiement (un lot : 70 m³, teneur en PCE < 10 mg/kg ms) </td> </tr> <tr> <td>Support</td> <td colspan="2"> 1) Intégration des teneurs air dans le temps, 1 mesure PID toutes les heures corrélée avec des mesures laboratoires mensuelles 2) 1 mesure de PCE sur les sols traités par lot 70 m³, moyen représentatif composé de 10 aliquotes </td> </tr> <tr> <td>Répartition dans l'espace</td> <td colspan="2"> 1 mesure de PCE sur les sols traités par lot 70 m³, 1 analyse de fond de fouille par 75m² et pas d'analyse de bord de fouilles du fait de </td> </tr> </table>			Nombre	<u>Contrôle du venting :</u> 2 PID posés aux entrées-sorties des bacs à charbon actif + Analyses de l'air pour corréler les valeurs PID (facteur calculé par analyse air x débit x durée)		Types	<u>Contrôle du venting :</u> Gaz extrait des aiguilles de venting (concentrations et débits hebdomadaires à journaliers) <u>Contrôle de l'excavation :</u> Teneurs mesurées dans les lots de matériaux excavés et traités, avant remblaiement (un lot : 70 m ³ , teneur en PCE < 10 mg/kg ms)		Support	1) Intégration des teneurs air dans le temps, 1 mesure PID toutes les heures corrélée avec des mesures laboratoires mensuelles 2) 1 mesure de PCE sur les sols traités par lot 70 m ³ , moyen représentatif composé de 10 aliquotes		Répartition dans l'espace	1 mesure de PCE sur les sols traités par lot 70 m ³ , 1 analyse de fond de fouille par 75m ² et pas d'analyse de bord de fouilles du fait de	
Nombre	<u>Contrôle du venting :</u> 2 PID posés aux entrées-sorties des bacs à charbon actif + Analyses de l'air pour corréler les valeurs PID (facteur calculé par analyse air x débit x durée)														
Types	<u>Contrôle du venting :</u> Gaz extrait des aiguilles de venting (concentrations et débits hebdomadaires à journaliers) <u>Contrôle de l'excavation :</u> Teneurs mesurées dans les lots de matériaux excavés et traités, avant remblaiement (un lot : 70 m ³ , teneur en PCE < 10 mg/kg ms)														
Support	1) Intégration des teneurs air dans le temps, 1 mesure PID toutes les heures corrélée avec des mesures laboratoires mensuelles 2) 1 mesure de PCE sur les sols traités par lot 70 m ³ , moyen représentatif composé de 10 aliquotes														
Répartition dans l'espace	1 mesure de PCE sur les sols traités par lot 70 m ³ , 1 analyse de fond de fouille par 75m ² et pas d'analyse de bord de fouilles du fait de														

			la mise en place de palplanches pour soutènement.
--	--	--	---

<i>Comparaison des estimations de diagnostic et résultats de dépollution</i>					
Estimation globale (masses de polluants, volumes ou tonnages de terres par filière, etc...)	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Diagnostic (géostatistique)</th> <th>Dépollution (bilan de masse)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td> Masse de polluants initiale : <ul style="list-style-type: none"> - 720 kg (médiane des valeurs simulées) - 650 à 790 kg (intervalle de confiance à 90%) </td> <td> Masse de polluants extraite : <ul style="list-style-type: none"> - 736 kg - Nous considérons avoir enlevé quasiment 100% du stock de polluant dans les terres excavées, car le traitement mené a permis d'atteinte des teneurs de l'ordre de 5mg/kg dans les sols (méthanol) - Incertitude non calculée </td> </tr> </tbody> </table>	Diagnostic (géostatistique)	Dépollution (bilan de masse)	Masse de polluants initiale : <ul style="list-style-type: none"> - 720 kg (médiane des valeurs simulées) - 650 à 790 kg (intervalle de confiance à 90%) 	Masse de polluants extraite : <ul style="list-style-type: none"> - 736 kg - Nous considérons avoir enlevé quasiment 100% du stock de polluant dans les terres excavées, car le traitement mené a permis d'atteinte des teneurs de l'ordre de 5mg/kg dans les sols (méthanol) - Incertitude non calculée
Diagnostic (géostatistique)	Dépollution (bilan de masse)				
Masse de polluants initiale : <ul style="list-style-type: none"> - 720 kg (médiane des valeurs simulées) - 650 à 790 kg (intervalle de confiance à 90%) 	Masse de polluants extraite : <ul style="list-style-type: none"> - 736 kg - Nous considérons avoir enlevé quasiment 100% du stock de polluant dans les terres excavées, car le traitement mené a permis d'atteinte des teneurs de l'ordre de 5mg/kg dans les sols (méthanol) - Incertitude non calculée 				
Estimation locale (localisation des zones les plus polluées)	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Diagnostic</th> <th>Dépollution</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Nombre élevé de sondage et d'échantillon permettant de bien localiser la zone source</td> <td> Mesures en fonds de fouilles (pas en paroi car blindage) Mesure de gaz de sol sur le site et hors site, pour valider l'extraction de la zone source </td> </tr> </tbody> </table>	Diagnostic	Dépollution	Nombre élevé de sondage et d'échantillon permettant de bien localiser la zone source	Mesures en fonds de fouilles (pas en paroi car blindage) Mesure de gaz de sol sur le site et hors site, pour valider l'extraction de la zone source
Diagnostic	Dépollution				
Nombre élevé de sondage et d'échantillon permettant de bien localiser la zone source	Mesures en fonds de fouilles (pas en paroi car blindage) Mesure de gaz de sol sur le site et hors site, pour valider l'extraction de la zone source				
Appréciation du donneur d'ordre sur ces résultats	Très bonne appréciation : déroulement sans encombre malgré la complexité. Bonne tenue des plannings, de la qualité des rejets et des objectifs atteints : résultats sol, air des sols et air ambiant après traitement				
Appréciation du bureau d'étude/de la société de dépollution sur ces résultats	Diagnostic très précis avec un grand nombre d'échantillons par rapport à la taille du site. Il est très important de réaliser un diagnostic précis avant de se lancer dans la dépollution. Chantier complexe exigü, instrumenté (détecteurs PID dans les chapiteaux, en entrée et sortie des unités de traitement, et suivi de la qualité de l'air ambiant autour des chapiteaux, suivi de la qualité de l'air dans le voisinage) avec une très bonne protection des opérateurs, qui s'est bien déroulé.				
Impacts des écarts éventuels					

<i>Avis d'expert sur les raison des écarts ou similitudes observés entre estimations de diagnostic et résultats de dépollution</i>	
Liste hiérarchisée des éléments pouvant expliquer les écarts ou la similitude des résultats	L'erreur d'estimation est très faible (2% en sous-estimation) et la totalité des facteurs favorisant une bonne estimation sont remplis : <ul style="list-style-type: none"> - Le cas est moyennement complexe (sachant que tous les sites de l'étude sont complexes), - Le site a subi un traitement in situ, ce qui induit généralement une intensité et un niveau de technicité des

	<p>investigations élevés,</p> <ul style="list-style-type: none"> - Les investigations de diagnostic remplissent 4 des 5 facteurs identifiés comme éléments favorables à la réduction des écarts (densité de sondage de 1 pour 40 m², protocole d'échantillonnage homogène, échantillons prélevés de manière systématique et orientée sur la verticale, 1.3 échantillons/m sont en moyenne prélevés sur la verticale), - En complément du jugement d'expert, l'estimation de diagnostic a été réalisée par des méthodes géostatistiques mises en œuvre dans les règles de l'art.
Suggestion d'amélioration des estimations (diagnostic/dépollution)	<ul style="list-style-type: none"> - Un échantillonnage recouvrant de manière homogène la zone d'intérêt (p.ex. systématique aléatoire) permettrait d'améliorer encore la précision d'estimation. L'échantillonnage pratiqué semble en effet laisser des zones lacunaires à côté de zones sur-échantillonnées et aurait pu être optimisé. - La question de la comparaison de l'estimation de masse réalisée à l'aide de méthodes d'interpolation à partir de concentrations en place, au bilan de masse effectué en dépollution, reste ouverte.

Références sur le site

Références pour les sites sans contrainte de confidentialité, publications, etc.

http://basol.developpement-durable.gouv.fr/fiche.php?page=6&index_sp=94.0055

Autres illustrations

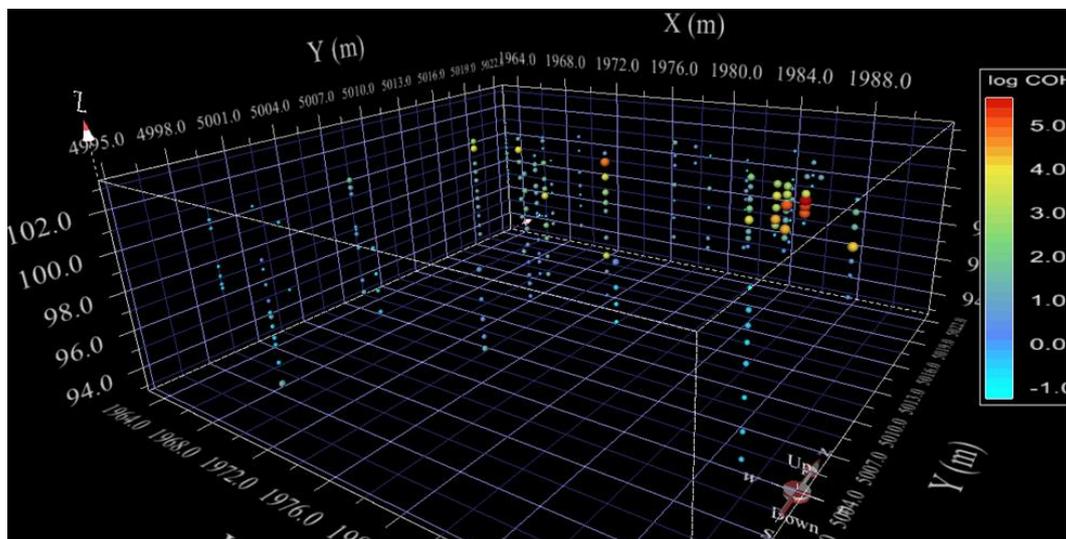


Figure 2 Représentation 3D des données utilisées pour estimer les masses de polluants en place dans la zone source du site à l'aide de simulations géostatistiques (logiciel Isatis © Geovariances).

Site B – Ancienne usine de fabrication automobile – Hydrocarbures lourds - excavation

<i>Caractéristiques générales</i>	
Activité(s) à l'origine de la pollution	Fabrication de pièces automobiles
Période(s) et durée(s) d'activité	1925 – 2010 (85 ans)
Surface du site (parcelle(s))	73000 m ²
Types de substances justifiant une dépollution	Hydrocarbures lourds (C20 – C40, huiles)
Gammes de concentrations par milieu atteint (sol, eau souterraine, eau surface, air intérieur, sédiments,...)	Sol : LQ – 25000 mg/kg ms Nappe < LQ
Types de terrains atteints par la pollution	Remblais (marnes, limons, sables grossiers) de 0 à 3 m, Alluvions sableuses de 3 à 6 m
Caractéristiques de la (des) nappe (s) atteinte (s) par la pollution	Nappe alluviale à 6 m
Occupation du site et de ses environs	Zone urbaine

<i>Etudes et travaux réalisés sur le site pollué</i>	
2010	Diagnostic
2012	Diagnostic complémentaire (sondages pour préparer la dépollution des sols aux Composés Organohalogénés Volatils (COV) par venting ; sondages non ciblés sur la caractérisation des hydrocarbures lourds)
2014	Diagnostic complémentaire (sondages en vue de la préparation du terrassement des terres polluées aux hydrocarbures – second secteur)
2012	Dépollution par excavation des terres – premier secteur
2014	Dépollution par excavation des terres – second secteur
<i>Caractéristiques de la dépollution</i>	
Type(s) de dépollution	Hors site par excavation des terres
Technique(s) de dépollution	Excavation, tri et orientation des terres vers différentes filières (décharge, biocentre, lavage) Délimitation de 13 zones (lots) à dépolluer
Description détaillée des objectifs fixés à la dépollution	Teneurs en HCT (indices hydrocarbures totaux) < 500 mg/kg ms dans les sols restant en place après la dépollution (objectif pour les besoins du projet immobilier) Teneurs en HCT < 5000 mg/kg ms (objectif fixé par l'Autorité)

<i>Estimations des quantités et localisation de la pollution en diagnostic</i>	
Type de méthode d'estimation utilisée	Estimation en 3 phases : 1) Interpolation déterministe pour une première estimation des volumes et des coûts (ordre de grandeur), après le premier diagnostic (Figure 2) 2) Délimitation manuelle des zones de dépassement du

	<p>seuil (jugement d'expert), sur base des mêmes données que la phase 1</p> <p>3) Interpolation déterministe par voisin naturel + affinage manuel de la carte sur base de jugement d'expert, avec de nouvelles données (2010 – 2014) (Figure 3)</p>														
Méthode précise d'estimation	<p>1) Interpolation déterministe (méthode précise non connue)</p> <p>2) Délimitation manuelle : identification de la limite / seuil en fonction de la connaissance du comportement de la pollution (hydrocarbures lourds, peu mobiles) et du terrain</p> <p>3) L'interpolation permet d'avoir une première cartographie rapide de la pollution, qui est retravaillée en fonction de la connaissance du site et de la pollution.</p>														
Dimension	2 cartes 2D, pour les couches de terrain 0-3 m et 3-6 m														
Spécificités des données utilisées	<p>Phases 1 et 2 d'estimation :</p> <table border="1"> <tr> <td>Nombre</td> <td>686 données dont : <ul style="list-style-type: none"> - 371 échantillons de sol, prélevés entre 0 et 3 m de profondeur - 315 échantillons, prélevés entre 3 et 6 m de profondeur </td> </tr> <tr> <td>Types</td> <td>Analyses labo des HCT dans le sol</td> </tr> <tr> <td>Support</td> <td>Variable : échantillons représentatifs de 1 à 2 m de hauteur Echantillons prélevés dans des sondages à la tarière (293 sondages), et au Geoprobe (~140 sondages)</td> </tr> <tr> <td>Répartition dans l'espace</td> <td>1 sondage par maille 15 m x 15 m, au centre de la maille</td> </tr> </table> <p>Phase 3 d'estimation :</p> <table border="1"> <tr> <td>Nombre</td> <td>1380 données dont : <ul style="list-style-type: none"> - Les 686 des phases 1 et 2 - 694 supplémentaires collectées dans 262 sondages à la tarière (traitement ciblé COV 2012) + 81 sondages à la pelle mécanique (cible HCT lourds) <p>Au total : 718 données 0-3 m, 662 données 3-6 m</p> </td> </tr> <tr> <td>Types</td> <td>Analyses sol des HCT dans le même laboratoire</td> </tr> <tr> <td>Support</td> <td>Prélèvement de 2 échantillons dans chacun des sondages : <ul style="list-style-type: none"> - Un dans les remblais - Un dans le terrain naturel <p>Support : échantillon représentatif de 1 à 2 m de hauteur environ</p> </td> </tr> </table>	Nombre	686 données dont : <ul style="list-style-type: none"> - 371 échantillons de sol, prélevés entre 0 et 3 m de profondeur - 315 échantillons, prélevés entre 3 et 6 m de profondeur 	Types	Analyses labo des HCT dans le sol	Support	Variable : échantillons représentatifs de 1 à 2 m de hauteur Echantillons prélevés dans des sondages à la tarière (293 sondages), et au Geoprobe (~140 sondages)	Répartition dans l'espace	1 sondage par maille 15 m x 15 m, au centre de la maille	Nombre	1380 données dont : <ul style="list-style-type: none"> - Les 686 des phases 1 et 2 - 694 supplémentaires collectées dans 262 sondages à la tarière (traitement ciblé COV 2012) + 81 sondages à la pelle mécanique (cible HCT lourds) <p>Au total : 718 données 0-3 m, 662 données 3-6 m</p>	Types	Analyses sol des HCT dans le même laboratoire	Support	Prélèvement de 2 échantillons dans chacun des sondages : <ul style="list-style-type: none"> - Un dans les remblais - Un dans le terrain naturel <p>Support : échantillon représentatif de 1 à 2 m de hauteur environ</p>
Nombre	686 données dont : <ul style="list-style-type: none"> - 371 échantillons de sol, prélevés entre 0 et 3 m de profondeur - 315 échantillons, prélevés entre 3 et 6 m de profondeur 														
Types	Analyses labo des HCT dans le sol														
Support	Variable : échantillons représentatifs de 1 à 2 m de hauteur Echantillons prélevés dans des sondages à la tarière (293 sondages), et au Geoprobe (~140 sondages)														
Répartition dans l'espace	1 sondage par maille 15 m x 15 m, au centre de la maille														
Nombre	1380 données dont : <ul style="list-style-type: none"> - Les 686 des phases 1 et 2 - 694 supplémentaires collectées dans 262 sondages à la tarière (traitement ciblé COV 2012) + 81 sondages à la pelle mécanique (cible HCT lourds) <p>Au total : 718 données 0-3 m, 662 données 3-6 m</p>														
Types	Analyses sol des HCT dans le même laboratoire														
Support	Prélèvement de 2 échantillons dans chacun des sondages : <ul style="list-style-type: none"> - Un dans les remblais - Un dans le terrain naturel <p>Support : échantillon représentatif de 1 à 2 m de hauteur environ</p>														

	Répartition dans l'espace	Resserrements ciblés pour délimiter des spots de pollution (valider/invalidier) Positionnement dans des zones peu renseignées								
Données indirectes utilisées dans l'estimation ?	<p>Pas d'informations organoleptiques, car les hydrocarbures lourds non altérés sont incolores et inodores.</p> <p>Les infrastructures sont intégrées à l'estimation : la cartographie tient compte du rôle des caniveaux dans la dissémination de la pollution.</p> <table border="1"> <tr> <td>Nombre</td> <td>~3-4 caniveaux</td> </tr> <tr> <td>Types</td> <td>Infrastructures (caniveaux)</td> </tr> <tr> <td>Support</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>Conditions d'intégration dans l'estimation</td> <td>Délimitation manuelle</td> </tr> </table>		Nombre	~3-4 caniveaux	Types	Infrastructures (caniveaux)	Support	-	Conditions d'intégration dans l'estimation	Délimitation manuelle
Nombre	~3-4 caniveaux									
Types	Infrastructures (caniveaux)									
Support	-									
Conditions d'intégration dans l'estimation	Délimitation manuelle									
Densité des données utilisées	<p>1 donnée directe HCT pour 53 m²</p> <p>1 donnée directe HCT pour 317 m³</p>									
Points spécifiques géostatistiques	<table border="1"> <tr> <td>Y a-t'il eu transformation/back-transformation des données en distribution gaussienne ?</td> <td>Ne s'applique pas ici (interpolation déterministe + jugement d'expert)</td> </tr> <tr> <td>Dégroupement réalisé en cas de clusters ?</td> <td>Non</td> </tr> <tr> <td>Vérifier si un changement de support diag-dépol a été modélisé.</td> <td>Non</td> </tr> <tr> <td>En cas d'excavation des sols, un facteur de foisonnement des sols a-t'il été appliqué dans l'estimation ?</td> <td>oui (volumes systématiquement corrigés de ce facteur pour être comparables)</td> </tr> </table>		Y a-t'il eu transformation/back-transformation des données en distribution gaussienne ?	Ne s'applique pas ici (interpolation déterministe + jugement d'expert)	Dégroupement réalisé en cas de clusters ?	Non	Vérifier si un changement de support diag-dépol a été modélisé.	Non	En cas d'excavation des sols, un facteur de foisonnement des sols a-t'il été appliqué dans l'estimation ?	oui (volumes systématiquement corrigés de ce facteur pour être comparables)
Y a-t'il eu transformation/back-transformation des données en distribution gaussienne ?	Ne s'applique pas ici (interpolation déterministe + jugement d'expert)									
Dégroupement réalisé en cas de clusters ?	Non									
Vérifier si un changement de support diag-dépol a été modélisé.	Non									
En cas d'excavation des sols, un facteur de foisonnement des sols a-t'il été appliqué dans l'estimation ?	oui (volumes systématiquement corrigés de ce facteur pour être comparables)									

Estimations des quantités et localisation de la pollution en dépollution

Méthode d'estimation utilisée	<p>Excavation dans les zones identifiées comme polluées en diagnostic</p> <p>Volume pollué excavé calculé par comptage des camions</p> <p>Contrôle de la qualité des terres dans chaque lot de 250 m³ : prélèvement ponctuel tous les 20 m³ (un échantillon pris à la truelle dans le godet de la pelle mécanique, avant chargement dans le camion), constitution d'un échantillon composite (seau), analyse des HCT au même laboratoire que celui utilisé en diagnostic</p> <p>Contrôle de l'absence de pollution résiduelle en paroi et fond de fouilles (174 échantillons avec analyses des HCT) :</p> <ul style="list-style-type: none"> - 1 échantillon composite tous les 100 m² en paroi - 1 échantillon tous les 200 m² en fond de fouille
Spécificités des données utilisées	

	Nombre	92 données dans les lots de 250 m3 dans les zones polluées 174 données en fond et parois de fouilles Total : 266 données
	Types	Cf. ci-dessus
	Support	Homogène dans les zones polluées Support différent en paroi et fond de fouille
	Répartition dans l'espace	Systématique dans les zones polluées Forte densité dans les zones polluées

Comparaison des estimations de diagnostic et résultats de dépollution

Estimation globale (masses de polluants, volumes ou tonnages de terres par filière, etc...)	Volumes dont les concentrations en HCT sont > 500 mg/kg ms (en m ³) :																									
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Conc.</th> <th colspan="3">Diagnostic</th> <th>Dépollution</th> </tr> <tr> <th>mg/kg ms</th> <th>Phase 1</th> <th>Phase 2</th> <th>Phase 3</th> <th>-</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>500 - 5000</td> <td>50000</td> <td>28000</td> <td>21500</td> <td>21000</td> </tr> <tr> <td>> 5000</td> <td>23000</td> <td>12500</td> <td>14000</td> <td>15000</td> </tr> <tr> <td>TOTAL</td> <td>73000</td> <td>40500</td> <td>35500</td> <td>36000</td> </tr> </tbody> </table>	Conc.	Diagnostic			Dépollution	mg/kg ms	Phase 1	Phase 2	Phase 3	-	500 - 5000	50000	28000	21500	21000	> 5000	23000	12500	14000	15000	TOTAL	73000	40500	35500	36000
Conc.	Diagnostic			Dépollution																						
mg/kg ms	Phase 1	Phase 2	Phase 3	-																						
500 - 5000	50000	28000	21500	21000																						
> 5000	23000	12500	14000	15000																						
TOTAL	73000	40500	35500	36000																						
Estimation locale (localisation des zones les plus polluées)	Pas de découverte d'autres zones polluées en cours de dépollution, que celles estimées en diagnostic																									
Appréciation du donneur d'ordre sur ces résultats	<p>Le promoteur :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Pas de jugement des quantités estimées/découvertes - Très content de l'opération globale : dépollution terminée avant la construction (il n'a plus à s'en occuper) <p>Les Autorités :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Rapports transmis depuis plus d'1 an, en attente de leur réponse 																									
Appréciation du bureau d'étude/de la société de dépollution sur ces résultats	<p>Le cas modèle</p> <p>Pas de retard</p>																									
Impacts des écarts éventuels																										

Avis d'expert sur les raisons des écarts ou similitudes observés entre estimations de diagnostic et résultats de dépollution

Liste hiérarchisée des éléments pouvant expliquer les écarts ou la similitude des résultats	<p>L'erreur d'estimation est très faible (1% en sous-estimation) et l'essentiel des facteurs favorisant une bonne estimation sont remplis :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Le cas est relativement peu complexe (sachant que tous les sites de l'étude sont complexes), - Le niveau de fiabilité du volume de sol excavé est bon, en raison de prélèvements/analyses de contrôle en bords/fonds de fouilles, ainsi que dans les matériaux de la fouille, - Les investigations de diagnostic remplissent 3 des 5
---	--

	<p>facteurs identifiés comme éléments favorables à la réduction des écarts (protocole d'échantillonnage homogène, échantillons prélevés de manière systématique et orientée sur la verticale, recouvrement de la zone d'intérêt par un échantillonnage selon un maillage régulier,</p> <ul style="list-style-type: none"> - L'estimation de diagnostic a été réalisée par des méthodes déterministes venant compléter le jugement d'expert.
<p>Suggestion d'amélioration des estimations (diagnostic/dépollution)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - La densité d'échantillonnage dans le plan (1 sondage pour 183 m²) et sur la verticale (1 échantillon pour 3 m), est plus faible que celle reconnue comme favorable à une diminution de l'erreur d'estimation. Cette faible densité est probablement compensée par la relative faible complexité du cas, car les erreurs sont très faibles. - La répartition de la pollution a par ailleurs fait l'objet d'une interprétation minutieuse, en complément du premier modèle fourni par une méthode d'interpolation déterministe. - La géostatistique aurait permis une quantification des incertitudes relatives aux estimations de volumes de terres non compatibles.

Autres illustrations

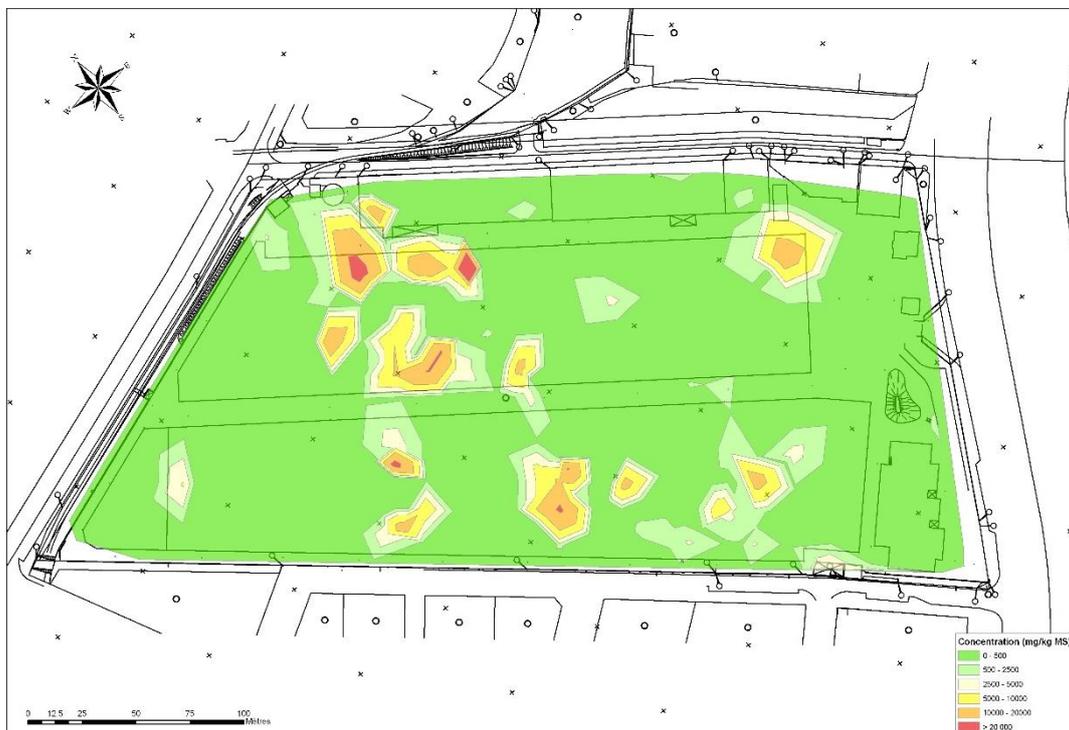


Figure 2 Cartographie par interpolation déterministe sur la base des données du premier diagnostic (phase 1 d'estimation).

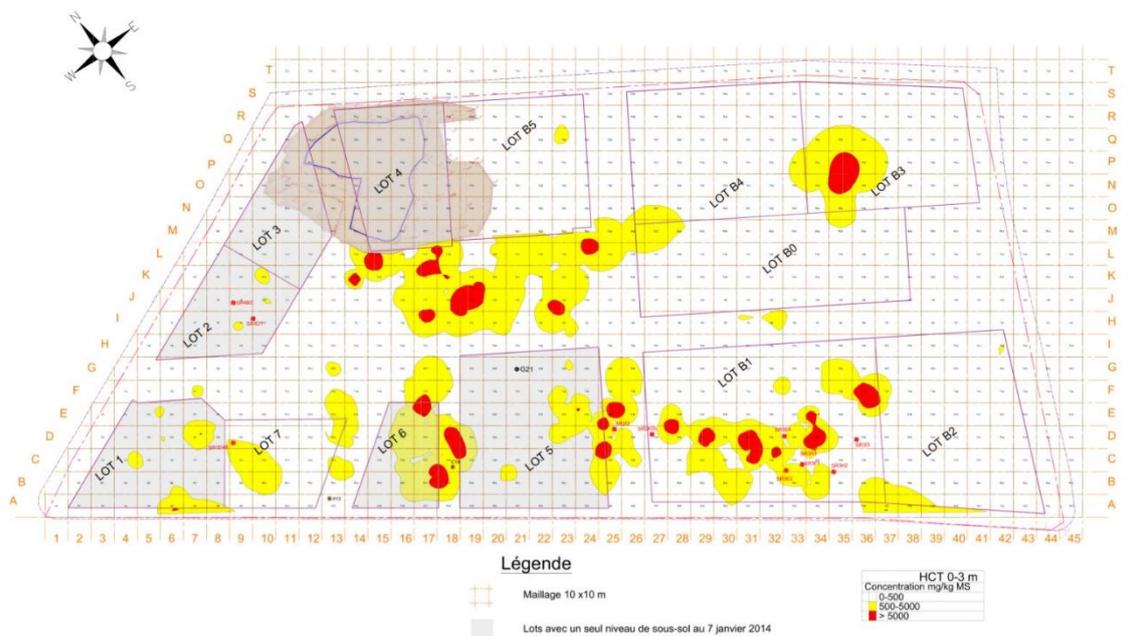


Figure 3 Cartographie par interpolation déterministe, corrigée par jugement d'expert, sur la base des données du premier diagnostic et du diagnostic complémentaire (phase 3 d'estimation).

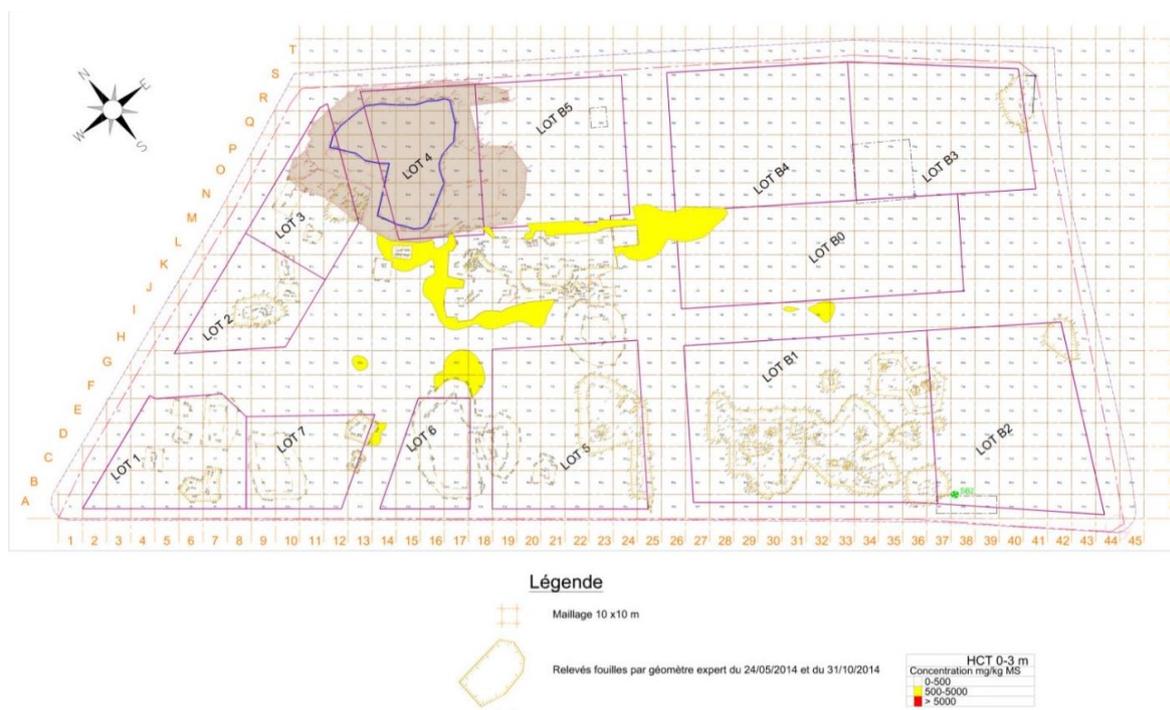


Figure 4 Cartographie des fouilles et de la pollution résiduelle après dépollution, relevées par un géomètre.

Site C – Ancienne usine de fabrication automobile – TCE - Venting

<i>Caractéristiques générales</i>	
Activité(s) à l'origine de la pollution	Fabrication de pièces automobiles
Période(s) d'activité	1925 – 2010 (85 ans)
Surface du site (parcelle(s))	73000 m ²
Types de substances justifiant une dépollution	Hydrocarbures chlorés (trichloréthylène (TCE) principalement)
Gammes de concentrations par milieu atteint (sol, eau souterraine, eau surface, air intérieur, sédiments,...)	Sol < 540 mg/kg ms Air du sol < 9.5 g/m ³
Types de terrains atteints par la pollution	Remblais (marnes, limons, sables grossiers) de 0 à 3 m, Alluvions sableuses de 3 à 6 m
Caractéristiques de la (des) nappe (s) atteinte (s) par la pollution	Nappe alluviale à 6 m
Occupation du site et de ses environs	Zone urbaine

<i>Etudes et travaux réalisés sur le site pollué</i>	
2010	Diagnostic (1)
2012	Diagnostic complémentaire (2) (sondages pour préparer la dépollution des sols aux Composés Organohalogénés Volatils (COV) par venting)
2011 - 2013	Dépollution par venting

<i>Caractéristiques de la dépollution</i>	
Type(s) de dépollution	In situ par venting
Technique(s) de dépollution	Venting
Description détaillée des objectifs fixés à la dépollution	Teneurs en COV < 2 mg/kg ms (objectif quantitatif fixé avec le promoteur) Suppression des risques sanitaires pour les futurs usagers (objectif fixé par les Autorités)

<i>Estimations des quantités et localisation de la pollution en diagnostic</i>						
Type de méthode d'estimation utilisée	Jugement d'expert					
Méthode précise d'estimation	Cartographie par interpolation déterministe, délimitation de zones polluées (teneurs en COV > seuil), puis calcul de moyennes par zones.					
Dimension	2 cartes 2D, pour les couches de terrain 0-3 m et 3-6 m					
Spécificités des données utilisées	Diagnostic 1 :					
	<table border="1"> <tr> <td>Nombre</td> <td>705 données dont :</td> </tr> <tr> <td></td> <td>- 461 échantillons de sol, prélevés entre 0 et 3 m de profondeur</td> </tr> <tr> <td></td> <td>- 244 échantillons, prélevés</td> </tr> </table>	Nombre	705 données dont :		- 461 échantillons de sol, prélevés entre 0 et 3 m de profondeur	
Nombre	705 données dont :					
	- 461 échantillons de sol, prélevés entre 0 et 3 m de profondeur					
	- 244 échantillons, prélevés					

		entre 3 et 6 m de profondeur
	Types	Analyses labo des COV dans les sols
	Support	Variable : échantillons représentatifs de 1 à 2 m de hauteur Echantillons prélevés dans des sondages à la tarière (293 sondages), et au Geoprobe (~140 sondages)
	Répartition dans l'espace	1 sondage par maille 15 m x 15 m, au centre de la maille Recouvrement de tout le secteur d'étude
	Diagnostic 2 :	
	Nombre	265 données dont : - 244 dans la couche 0-3 m - 21 dans la couche 3-6 m données collectées dans des sondages à la pelle mécanique
	Types	Analyse des COV dans le même labo
	Support	Prélèvement de 2 échantillons dans chacun des sondages : - Un dans les remblais - Un dans le terrain naturel Support : échantillons représentatifs de 1 à 2 m de hauteur environ
	Répartition dans l'espace	Echantillonnage ciblé (resserremments) dans les zones polluées
Données indirectes utilisées dans l'estimation ?	Non	
Densité des données utilisées	1 donnée directe HCT pour 75 m ² 1 donnée directe HCT pour 452 m ³	
Points spécifiques géostatistiques	Y a-t' il eu transformation/back-transformation des données en distribution gaussienne ?	Ne s'applique pas ici (interpolation déterministe + jugement d'expert)
	Dégrouperement réalisé en cas de clusters ?	Oui
	Vérifier si un changement de support diag-dépol a été modélisé.	Non, mais pas nécessaire ici (traitement in situ)
	En cas d'excavation des sols, un facteur de foisonnement des sols a-t' il été appliqué dans l'estimation ?	Ne s'applique pas ici (traitement in situ)

Estimations des quantités et localisation de la pollution en dépollution

Méthode d'estimation utilisée	Estimation globale (masses extraites) : bilan de masse des
-------------------------------	--

	<p>quantités récupérées de produit pur et des flux de COV vers les charbons actifs perdus</p> <p>Estimation locale (suivi de la dépollution) :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Cartographie des mesures PID à l'aide d'une méthode d'interpolation déterministe, à pas de temps réguliers - Campagnes de prélèvement d'air dans les puits de venting tous les 6 mois <p>Estimation locale (réception des travaux) :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Prélèvements de sol au Geoprobe (pour contrôle de l'objectif fixé avec le promoteur) - Prélèvement d'air dans chaque puits de venting (pour contrôle de l'objectif sanitaire des Autorités)
Spécificités des données utilisées	Cf. ci-dessus

<i>Comparaison des estimations de diagnostic et résultats de dépollution</i>					
Estimation globale (masses de polluants, volumes ou tonnages de terres par filière, etc...)	<p>Masse de COV en place :</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>Diagnostic</th> <th>Dépollution</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">2282 kg</td> <td style="text-align: center;">2500 kg</td> </tr> </tbody> </table> <p>Dépollution : 1400 kg ont été récupérés sous forme de produit pur.</p> <p>Pollution résiduelle estimée à : 500 kg.</p> <p>Rq : ces estimations correspondent à la somme des masses dans les couches 0-3 m et 3-6 m.</p>	Diagnostic	Dépollution	2282 kg	2500 kg
Diagnostic	Dépollution				
2282 kg	2500 kg				
Estimation locale (localisation des zones les plus polluées)	Pas de remise en cause des zones polluées par les mesures de suivi et de contrôle post-travaux.				
Appréciation du donneur d'ordre sur ces résultats	<p>Le promoteur :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Pas de jugement des quantités estimées/découvertes - Très content de l'opération globale : dépollution terminée avant la construction (il n'a plus à s'en occuper) <p>Les Autorités :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Rapports transmis depuis plus d'1 an, en attente de leur réponse 				
Appréciation du bureau d'étude/de la société de dépollution sur ces résultats	<p>La masse de polluants à extraire pouvait être sur- ou sous-estimée par les méthodes d'estimation empiriques utilisées classiquement en diagnostic (moyennes globales ou locales). Le bureau d'étude a mené a posteriori une étude en interne pour comparer différentes méthodes d'estimation (moyennes, interpolations déterministes, krigeage, simulations conditionnelles). Cette étude montre que toutes les méthodes déterministes estiment des masses de polluants inférieures à celles fournies par une démarche géostatistique. La démarche géostatistique par génération de simulations fournit une estimation de la masse avec un intervalle de confiance la plus proche de la « réalité ».</p> <p>En faisant la somme des masses dans les couches 03- m et 3-6 m, on obtient en effet :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Moyenne 1 : 5290 kg 				

	<ul style="list-style-type: none"> - Moyenne 2 : 2005 kg - Polygones de Thiessen : 2200 kg - Voisin naturel : 2119 kg - Inverse des distances pondérée : 2480 kg - Krigeage : 3397 kg - Simulations conditionnelles : 3059 kg (intervalle de confiance 2099 ; 4387). <p>(A comparer à : 2500 + 500 = 3000 kg)</p>
Impacts des écarts éventuels	

Avis d'expert sur les raisons des écarts ou similitudes observés entre estimations de diagnostic et résultats de dépollution

Liste hiérarchisée des éléments pouvant expliquer les écarts ou la similitude des résultats	<p>L'erreur d'estimation est variable suivant la méthode d'estimation utilisée. Elle est de 24% en sous-estimation avec un jugement d'expert seul, 13% en surestimation avec une méthode géostatistique par krigeage, et 2% en surestimation avec une méthode géostatistique par simulation, dans les règles de l'art. Plusieurs facteurs sont favorables à la réduction des erreurs d'estimation :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Les investigations de diagnostic remplissent 2 des 5 facteurs identifiés comme éléments favorables à la réduction des écarts (recouvrement de la zone d'intérêt par un échantillonnage selon un maillage régulier, densité de sondage de 1 pour 66 m²). N.B. : 2 critères ne sont pas documentés : le protocole d'échantillonnage et les conditions d'échantillonnage sur la verticale. - Le cas est relativement peu complexe (sachant que tous les sites de l'étude sont complexes), - Le site a subi un traitement in situ, ce qui induit généralement une intensité et un niveau de technicité des investigations élevés,
Suggestion d'amélioration des estimations (diagnostic/dépollution)	<ul style="list-style-type: none"> - La comparaison des résultats d'estimation montre clairement l'avantage apporté par les méthodes géostatistiques. - La densité d'échantillonnage sur la verticale est plus faible que celle identifiée comme favorable à la réduction des écarts : elle est de 1 échantillon pour 3 m, au lieu de 1 échantillon par mètre. Elle gagnerait donc à être augmentée. - La question de la comparaison de l'estimation de masse réalisée à l'aide de méthodes d'interpolation à partir de concentrations en place, au bilan de masse effectué en dépollution, reste ouverte.

Site D – Ancienne usine à gaz – HAP – Excavation

<i>Caractéristiques générales</i>	
Activité(s) à l'origine de la pollution	Ancienne usine à gaz
Période(s) et durée(s) d'activité	1860 - 1955 (station gazométrique jusqu'en 1972) (95 ans)
Surface du site (parcelle(s))	16400 m ²
Types de substances justifiant une dépollution	Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) principalement
Gammes de concentrations par milieu atteint (sol, eau souterraine, eau surface, air intérieur, sédiments,...)	Sol : LQ (0.32) - 26000 mg/kg ms (16 HAP US EPA)
Types de terrains atteints par la pollution	Remblais sur 1 à 2 m (sables graveleux, mâchefers, briques), Alluvions fluviales sur 5 à 10 m (limons sableux à graviers fins)
Caractéristiques de la (des) nappe(s) atteinte(s) par la pollution	Nappe alluviale de la Seine à environ 3 m, nappe des calcaires de St Ouen et des sables de Beauchamp entre 10 et 15 m de profondeur
Occupation du site et de ses environs	Zone urbaine

<i>Etudes et travaux réalisés sur le site pollué</i>	
2006	Diagnostic sous forme de 2 campagnes de reconnaissance des sols
2007	Etude géostatistique avec et sans les données de la seconde campagne (objectif : évaluer l'intérêt des données apportées par la seconde campagne), menée en parallèle à une estimation classique, par jugement d'expert
2009	Dépollution par excavation et tri des sols
2009 et 2011	Etude géostatistique pour : <ul style="list-style-type: none"> - Comparer estimations de diagnostic et résultats de dépollution - Estimer la pollution résiduelle après dépollution

<i>Caractéristiques de la dépollution</i>	
Type(s) de dépollution	Hors site par excavation des terres
Technique(s) de dépollution	Excavation et tri pour élimination en filières de valorisation/stockage/traitement
Description détaillée des objectifs fixés à la dépollution	Objectifs fixés par une évaluation détaillée des risques semi-générique, pour une réutilisation en zone constructible : Teneurs en HAP < 500 mg/kg ms pour toutes les profondeurs Teneurs en BAP < 77 mg/kg ms entre 0 et 1 m de profondeur (benzo(a)pyrène)

Estimations des quantités et localisation de la pollution en diagnostic

Type de méthode d'estimation utilisée	Géostatistique confrontée au jugement d'expert																
Méthode précise d'estimation	<ol style="list-style-type: none"> 1) Co-simulations conditionnelles des concentrations en HAP et BAP 2) Cartographie des probabilités de dépassements conjoints des seuils 3) Estimation des volumes correspondant au dépassement des seuils 																
Dimension	3D, dans les remblais, de 0 à 2 m de profondeur (pas de dépassement des seuils des données de diagnostic dans le terrain naturel)																
Spécificités des données utilisées	<p>Diagnostic – 1^{ère} campagne :</p> <table border="1"> <tr> <td>Nombre</td> <td> Dans les remblais : <ul style="list-style-type: none"> - 53 données de HAP - 53 données de BAP - Echantillons prélevés dans 49 sondages et fouilles </td> </tr> <tr> <td>Types</td> <td>Analyse labo HAP et BAP dans le sol</td> </tr> <tr> <td>Support</td> <td> Taille des échantillons très variable, de 0.10 à 4 m d'épaisseur Mélange d'échantillons composites représentatifs d'une couche de remblais ou de terrain naturel, et d'échantillons préférentiels des couches de matériaux suspects (odeur et couleur) </td> </tr> <tr> <td>Répartition dans l'espace</td> <td>Répartition dans tout le domaine à caractériser, mais avec des zones lacunaires</td> </tr> </table> <p>Diagnostic – 2^{de} campagne :</p> <table border="1"> <tr> <td>Nombre</td> <td> Dans les remblais : <ul style="list-style-type: none"> - 25 données de HAP - 27 données de BAP - Echantillons prélevés dans 19 fouilles </td> </tr> <tr> <td>Types</td> <td> Analyse labo HAP et BAP dans le sol Laboratoires différents : au moins 2 en 1998 et 2005. </td> </tr> <tr> <td>Support</td> <td>Taille des échantillons très variable, allant de 0.1 à 2.3 m d'épaisseur</td> </tr> <tr> <td>Répartition dans l'espace</td> <td> Investigation d'une zone non renseignée par la première campagne Sondages complémentaires dans 3 zones déjà renseignées par la première campagne </td> </tr> </table>	Nombre	Dans les remblais : <ul style="list-style-type: none"> - 53 données de HAP - 53 données de BAP - Echantillons prélevés dans 49 sondages et fouilles 	Types	Analyse labo HAP et BAP dans le sol	Support	Taille des échantillons très variable, de 0.10 à 4 m d'épaisseur Mélange d'échantillons composites représentatifs d'une couche de remblais ou de terrain naturel, et d'échantillons préférentiels des couches de matériaux suspects (odeur et couleur)	Répartition dans l'espace	Répartition dans tout le domaine à caractériser, mais avec des zones lacunaires	Nombre	Dans les remblais : <ul style="list-style-type: none"> - 25 données de HAP - 27 données de BAP - Echantillons prélevés dans 19 fouilles 	Types	Analyse labo HAP et BAP dans le sol Laboratoires différents : au moins 2 en 1998 et 2005.	Support	Taille des échantillons très variable, allant de 0.1 à 2.3 m d'épaisseur	Répartition dans l'espace	Investigation d'une zone non renseignée par la première campagne Sondages complémentaires dans 3 zones déjà renseignées par la première campagne
Nombre	Dans les remblais : <ul style="list-style-type: none"> - 53 données de HAP - 53 données de BAP - Echantillons prélevés dans 49 sondages et fouilles 																
Types	Analyse labo HAP et BAP dans le sol																
Support	Taille des échantillons très variable, de 0.10 à 4 m d'épaisseur Mélange d'échantillons composites représentatifs d'une couche de remblais ou de terrain naturel, et d'échantillons préférentiels des couches de matériaux suspects (odeur et couleur)																
Répartition dans l'espace	Répartition dans tout le domaine à caractériser, mais avec des zones lacunaires																
Nombre	Dans les remblais : <ul style="list-style-type: none"> - 25 données de HAP - 27 données de BAP - Echantillons prélevés dans 19 fouilles 																
Types	Analyse labo HAP et BAP dans le sol Laboratoires différents : au moins 2 en 1998 et 2005.																
Support	Taille des échantillons très variable, allant de 0.1 à 2.3 m d'épaisseur																
Répartition dans l'espace	Investigation d'une zone non renseignée par la première campagne Sondages complémentaires dans 3 zones déjà renseignées par la première campagne																

Densité des données utilisées	<p>Volumes concernés : 17300 m³ de remblais, 47600 m³ de remblais et terrain naturel</p> <p>Rapporté au volume de remblais :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Diagnostic 1 : 1 donnée directe HAP/BAP pour 309 m², 1 donnée directe HAP/BAP pour 619 m³ - Diagnostic 2 : 1 donnée directe HAP/BAP pour 210 m², 1 donnée directe HAP/BAP pour 421 m³ <p>Rapporté au volume de remblais et terrain naturel :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Diagnostic 1 : 1 donnée directe HAP/BAP pour 309 m², 1 donnée directe HAP/BAP pour 898 m³ - Diagnostic 2 : 1 donnée directe HAP/BAP pour 210 m², 1 donnée directe HAP/BAP pour 610 m³ 										
Données indirectes utilisées dans l'estimation ?	Non, car pas de corrélation avec les autres paramètres mesurés/observés sur les échantillons										
Points à vérifier (infos internes à GV-eOde)	<table border="1"> <tr> <td>Y a-t-il eu transformation/back-transformation des données en distribution gaussienne ?</td> <td>Oui</td> </tr> <tr> <td>Dégrouperment réalisé en cas de clusters ?</td> <td>Etudié dans l'analyse exploratoire, mais pas nécessaire</td> </tr> <tr> <td>Vérifier si un changement de support diag-dépol a été modélisé.</td> <td>Oui</td> </tr> <tr> <td>En cas d'excavation des sols, un facteur de foisonnement des sols a-t'il été appliqué dans l'estimation ?</td> <td>Oui</td> </tr> <tr> <td>Autre</td> <td>Approximation des modèles de variogramme, du fait de l'absence de support homogène</td> </tr> </table>	Y a-t-il eu transformation/back-transformation des données en distribution gaussienne ?	Oui	Dégrouperment réalisé en cas de clusters ?	Etudié dans l'analyse exploratoire, mais pas nécessaire	Vérifier si un changement de support diag-dépol a été modélisé.	Oui	En cas d'excavation des sols, un facteur de foisonnement des sols a-t'il été appliqué dans l'estimation ?	Oui	Autre	Approximation des modèles de variogramme, du fait de l'absence de support homogène
Y a-t-il eu transformation/back-transformation des données en distribution gaussienne ?	Oui										
Dégrouperment réalisé en cas de clusters ?	Etudié dans l'analyse exploratoire, mais pas nécessaire										
Vérifier si un changement de support diag-dépol a été modélisé.	Oui										
En cas d'excavation des sols, un facteur de foisonnement des sols a-t'il été appliqué dans l'estimation ?	Oui										
Autre	Approximation des modèles de variogramme, du fait de l'absence de support homogène										

<i>Estimations des quantités et localisation de la pollution en dépollution</i>							
Méthode d'estimation utilisée	<p>Excavation dans 7 zones identifiées comme polluées en diagnostic</p> <p>Volume pollué excavé calculé par comptage des camions</p> <p>Contrôle de l'absence de pollution résiduelle en paroi et fond de fouilles :</p> <ul style="list-style-type: none"> - 1 échantillon composite par lithologie par bande de 2 m de haut sur 10 m de long en paroi (20 m²) - 1 échantillon composite de 5 prélèvements tous les 100 m² en fond de fouille <p>Contrôles en dehors des zones polluées</p>						
Spécificités des données utilisées	<table border="1"> <tr> <td>Nombre</td> <td>268 données. dont :</td> </tr> <tr> <td></td> <td>- 84 dans les remblais</td> </tr> <tr> <td></td> <td>- 153 dans le terrain naturel</td> </tr> </table>	Nombre	268 données. dont :		- 84 dans les remblais		- 153 dans le terrain naturel
Nombre	268 données. dont :						
	- 84 dans les remblais						
	- 153 dans le terrain naturel						

		(découvert comme pollué en cours de dépollution)
	Types	Cf. ci-dessus
	Support	Homogène dans les zones polluées : 80% des données sont représentatives d'une épaisseur de 0.2 à 0.3 m de sol Support différent en paroi et fond de fouille
	Répartition dans l'espace	Non régulière Forte densité dans les zones polluées

Comparaison des estimations de diagnostic et résultats de dépollution

Estimation globale (masses de polluants, volumes ou tonnages de terres par filière, etc...)	Volumes pollués à excaver en m ³ dans les 7 zones identifiées comme polluées, dans les remblais uniquement :	
	Diagnostic	Dépollution
	Géostatistique : 4760 m³ (médiane), au minimum 3840 m ³ et au maximum 5560 m ³	4609 m³ , dont 3533 m ³ de terres dans les zones polluées et 1076 m ³ de matériaux dans des ouvrages enterrés
	Jugement d'expert : 3242 m³ , dont 2210 m ³ de terres et 1032 m ³ de matériaux dans des ouvrages enterrés	
	<p>Rq. 1 : découverte en dépollution de sols pollués dans le terrain naturel, à plus de 2 m de profondeur, alors que les données de diagnostic ne le montraient pas (jusqu'à 5 m).</p> <p>Rq.2 : découverte en dépollution d'autres ouvrages enterrés remplis de matériaux souillés que ceux identifiés en diagnostic (13 au lieu de 8)</p> <p>Volumes de sols pollués résiduels, néanmoins ignorés dans la comparaison entre diagnostic et dépollution car localisés en dehors des 7 zones initiales :</p>	
	Diagnostic Géostatistique	Dépollution
	- 1344 m³ de sols pollués subsistent en dehors des zones (Min : 633 m ³ – Max : 2187 m ³) - 40 m ³ de sols pollués subsistent dans les zones (laissés en place pour des questions de stabilité des terrains)	- 1333 m³ de sols pollués ont été excavés en dehors des 7 zones. - bande de 2 m de large sur 175 m de long - flancs de fouille non conformes en limite Ouest du site
Estimation locale (localisation des zones les plus polluées)	Cohérence entre les zones polluées estimées avec le modèle géostatistique de diagnostic et les résultats de dépollution dans les 7 zones. Le modèle géostatistique prévoit de la pollution résiduelle en dehors des 7 zones polluées, qui s'avère avoir été éliminée lors de la dépollution.	
Appréciation du donneur d'ordre sur ces résultats	Bilan mitigé	

Appréciation du bureau d'étude/de la société de dépollution sur ces résultats	Nombreuses difficultés de modélisation liées à la qualité des données (support, localisation des zones dépolluées, identification des structures enterrées, etc...), et à l'hétérogénéité à petite distance de la pollution aux HAP
Impacts des écarts éventuels	Etude géostatistique de démonstration, non utilisée pour la conduite du projet

Avis d'expert sur les raisons des écarts ou similitudes observés entre estimations de diagnostic et résultats de dépollution

Liste hiérarchisée des éléments pouvant expliquer les écarts ou la similitude des résultats	<p><u>Avis des géostatisticiens ayant réalisé l'étude de démonstration :</u></p> <p>Résultats fournis par le modèle géostatistique assez proches des résultats de dépollution, hormis ce qui concerne les structures enterrées. La perception du donneur d'ordre fut pourtant plutôt négative. Raisons principales :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Les difficultés liées aux données ont incité les géostatisticiens à appliquer des techniques sophistiquées, qui ont « perdu » les interlocuteurs dans des détails. • Le post-traitement choisi des simulations était trop compliqué. Il proposait un choix de seuil de probabilité (niveau de risque) au donneur d'ordre, sans que celui-ci soit capable de l'évaluer au vu de la complexité de méthodes. • L'incapacité de la géostatistique à identifier les structures enterrées, a été perçue comme un inconvénient majeur de la méthode, alors que la plupart des sites d'anciennes usines à gaz en comportent. <p>Les résultats de modélisation auraient pu être plus convaincants si :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Le support des données de diagnostic avait été moins hétérogène (cela aurait évité des approximations dans l'inférence variographique). • Les données pour caractériser la pollution dans le terrain naturel avaient été suffisantes (arrêt des sondages dès que les teneurs étaient inférieures aux seuils, alors que de la pollution pouvait se trouver encore en profondeur). • La localisation et la délimitation des zones à dépolluer et des zones dépolluées avaient été fournies avec précision (cela aurait évité de devoir refaire tous les calculs géostatistiques). <p><u>Avis de l'équipe de projet de la présente étude RECORD :</u></p> <p>L'erreur d'estimation est de 30% en sous-estimation avec un jugement d'expert seul, 3% en surestimation avec une méthode géostatistique par simulation, menée dans les règles de l'art.</p> <p>Plusieurs facteurs sont défavorables à une bonne cohérence des volumes diagnostiqués vs. dépollués :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Selon la classification établie pour l'étude RECORD, le cas est relativement peu complexe (sachant que tous les sites de l'étude sont complexes), car un seul type de substances (HAP) est concerné par la dépollution, dans un seul type de terrain. L'étude RECORD montre néanmoins que ce sont les cas de pollution aux HAP qui
---	--

	<p>présentent les plus grandes erreurs d'estimation. Ce type de pollution est donc particulièrement difficile à estimer, quels que soient les méthodes d'estimation et les efforts d'échantillonnage entrepris.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Les investigations de diagnostic ne remplissent pas 4 des 5 facteurs identifiés comme éléments favorables à la réduction des écarts : la densité de sondage est de 1 pour 241 m², au lieu des 1 pour 100 m² recommandés, les sondages couvrent la zone d'intérêt de manière irrégulière avec des zones lacunaires et des zones sur-échantillonnées, le protocole de prélèvement est hétérogène et orienté sur la verticale. Seule la densité d'échantillonnage sur la verticale est favorable, avec 1 échantillon prélevé pour 0.7 m. - La fiabilité des résultats de dépollution est moyenne, car des contrôles analytiques en fonds, bords et en dehors des fouilles ont été réalisés, mais pas à l'intérieur des fouilles.
<p>Suggestion d'amélioration des estimations (diagnostic/dépollution)</p>	<p><u>Avis des géostatisticiens ayant réalisé l'étude de démonstration :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Elaborer la stratégie d'échantillonnage avec l'appui d'un géostatisticien, pour valoriser au maximum l'information collectée dans le modèle • Géoréférencer précisément : données, zones, etc... • Etre plus précis dans la description des conditions d'estimation des volumes et tonnages de matériaux pollués excavés <p><u>Avis de l'équipe de projet de la présente étude RECORD :</u></p> <p>En dépit du contexte d'estimation difficile, quelques améliorations peuvent néanmoins être suggérées pour réduire les écarts entre estimation de diagnostic et résultat de dépollution :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Augmentation de la fiabilité des résultats de dépollution par des contrôles analytiques à l'intérieur des fouilles. - Amélioration des conditions d'investigation en augmentant la densité de sondages, en assurant un recouvrement homogène de la zone d'intérêt (p.ex. par un maillage régulier ou systématique aléatoire), et en adoptant un protocole de prélèvement homogène (même support) et systématique sur la verticale. - Méthodes géostatistiques plutôt que jugement d'expert seul.

Autres illustrations

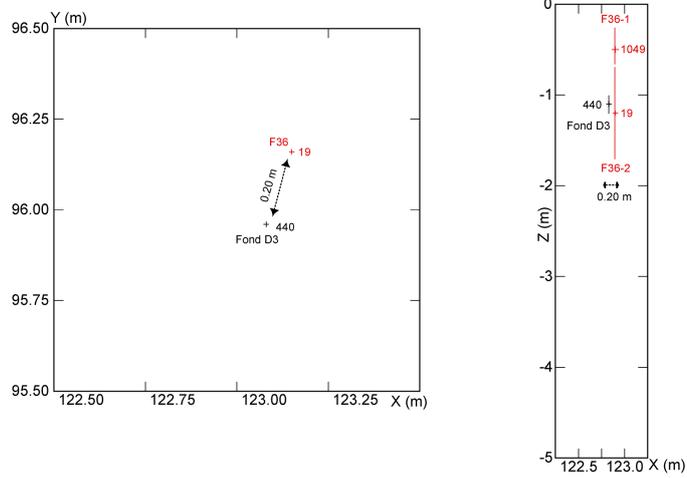


Figure 2 Problèmes d'effet de support rencontrés sur le site.

Site E – Ancien atelier de créosotage – HAP – Excavation

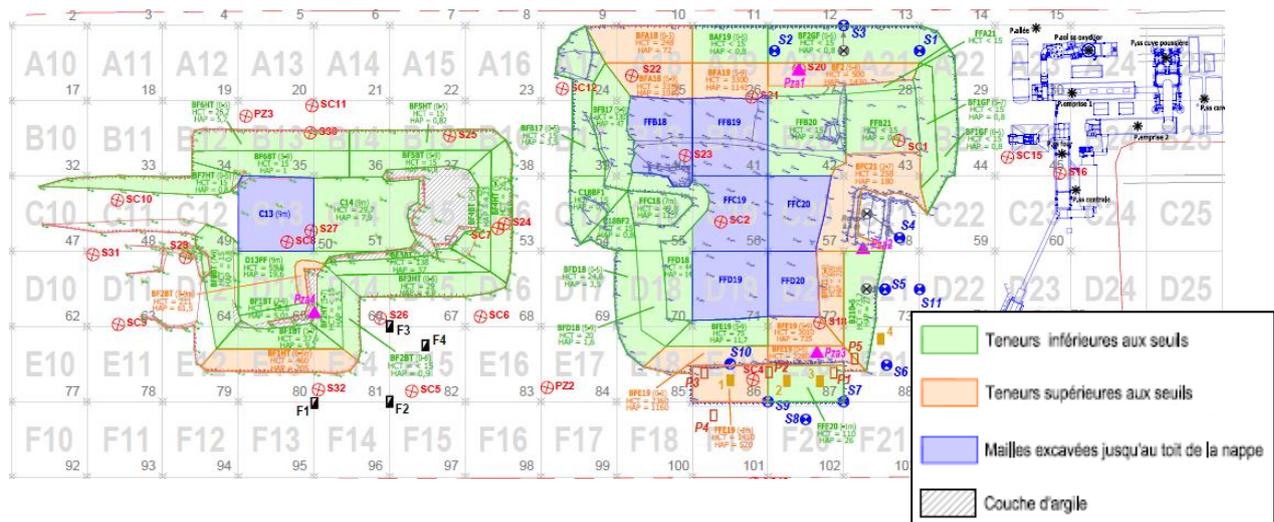


Figure 1 : Maillage et résultats d'analyses de contrôle en dépollution.

Caractéristiques générales	
Activité(s) à l'origine de la pollution	Site de fabrication d'appareils de voie (rails, aiguillages). Atelier de créosotage, cuves de fuel et créosote.
Période(s) et durée(s) d'activité	1918 – aujourd'hui (97 ans)
Surface du site (parcelle(s))	20 000 m ²
Types de substances justifiant une dépollution	Créosote (HAP) et hydrocarbures lourds (fuel lourd).
Gammes de concentrations par milieu atteint (sol, eau souterraine, eau surface, air intérieur, sédiments,...)	Les valeurs maximales relevées dans les sols atteignent, au droit des zones impactées : <ul style="list-style-type: none"> • HCT : 37 100 mg/kg_{MS} • HAP : 14 053 mg/kg_{MS} (somme des 16)
Types de terrains atteints par la pollution	<ul style="list-style-type: none"> • 0-1.5 m : remblais anthropiques (limono-sableux, graviers, débris...) • 1.5-4 m : limons • 4-8 m : sables graveleux • >8m : argile / argile sableuse ou craie blanche altérée
Caractéristiques de la (des) nappe (s) atteinte (s) par la pollution	Toit de l'aquifère régional (craie) rencontré à 9-10 m de profondeur. Plusieurs captages (eau potable, eau agricole) vulnérables à l'aval du site.
Occupation du site et de ses environs	Site encore en activité, présence d'installations.

Etudes et travaux réalisés sur le site pollué	
2007	20 sondages au carottier ou à la tarière au droit des installations potentiellement polluantes recensées et des zones d'impact observées. Profondeur investiguée : 3 à 14 mètres.

2008	18 sondages à la tarière mécanique. Profondeur investiguée : 0 à 10 mètres.
2011	Diagnostic avant travaux, 40 sondages à la tarière selon un maillage de 15m x 15m avec prélèvement de sol tous les 50cm. Profondeur investiguée : 0 à 9 mètres. Mesure systématique COV au PID. Essais géotechniques sur les 1 ^{ers} mètres.
2012	Dépollution

<i>Caractéristiques de la dépollution</i>	
Type(s) de dépollution	Sur site avec excavation.
Technique(s) de dépollution	Désorption thermique (14 mois).
Description détaillée des objectifs fixés à la dépollution	Seuils de dépollution à atteindre : <ul style="list-style-type: none"> • HAP : 50 mg/kg_{MS} • Hydrocarbures totaux : 2500 mg/kg_{MS}

<i>Estimations des quantités et localisation de la pollution en diagnostic</i>									
Type de méthode d'estimation utilisée	Déterministe + interpolation								
Méthode précise d'estimation	Estimation des mailles impactées en trois étapes suite au diagnostic avant travaux : <ul style="list-style-type: none"> • 178 mailles non compatibles • 21 mailles supplémentaires issues des diagnostics précédents • 53 mailles supplémentaires suite à l'interpolation. Au total, 252 mailles estimées « polluées ». Aucun détail n'est fourni concernant la méthode d'interpolation rapide utilisée par l'entreprise de travaux. Il est juste mentionné que : « <i>L'objet de cette interpolation est de limiter, dans l'intérêt du projet, le risque d'excaver des mailles identifiées comme propre à tort (risque de faux positifs) et donc le risque de laisser en place des terres polluées.</i> »								
Dimension									
Spécificités des données utilisées	<table border="1"> <tr> <td>Nombre</td> <td>40 sondages, 720 analyses</td> </tr> <tr> <td>Types</td> <td>Analyse HCT (C10-C40) et 16 HAP.</td> </tr> <tr> <td>Support</td> <td>Tarière de 60 mm. Prélèvements homogènes : 50 cm.</td> </tr> <tr> <td>Répartition dans l'espace</td> <td>Maillage régulier 15m x 15m</td> </tr> </table>	Nombre	40 sondages, 720 analyses	Types	Analyse HCT (C10-C40) et 16 HAP.	Support	Tarière de 60 mm. Prélèvements homogènes : 50 cm.	Répartition dans l'espace	Maillage régulier 15m x 15m
Nombre	40 sondages, 720 analyses								
Types	Analyse HCT (C10-C40) et 16 HAP.								
Support	Tarière de 60 mm. Prélèvements homogènes : 50 cm.								
Répartition dans l'espace	Maillage régulier 15m x 15m								
Densité des données utilisées	1 donnée directe HCT et HAP pour 28 m ² 1 donnée directe HCT et HAP pour 250 m ³								
Données indirectes utilisées dans l'estimation ?	Non								

Estimations des quantités et localisation de la pollution en dépollution

Méthode d'estimation utilisée	Tests colorimétriques, relevés organoleptiques et analyses de contrôle
Spécificités des données utilisées	<p>En cas de doute sur l'interprétation du test (couleur grisâtre) ou en présence d'indice organoleptique faible, une analyse en laboratoire est effectuée. 31 analyses ont été réalisées dans ce cadre.</p> <p>Réalisation de fouilles à la pelle mécanique en bordure de la zone excavée afin de valider l'absence d'impacts résiduels. Traitement de quelques mailles complémentaires.</p> <p>65 prélèvements en bord et fond de fouille d'échantillons composites (5 à 6 points par composite) par 200 m² pour analyse en laboratoire.</p> <p>Evaluation des impacts résiduels à proximité des fouilles sur base de sondages complémentaires.</p>

Comparaison des estimations de diagnostic et résultats de dépollution

Estimation globale (masses de polluants, volumes ou tonnages de terres par filière, etc...)	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Diagnostic</th> <th>Dépollution</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Volume de terres à traiter : 25 848 m³</td> <td>Volume de terres traitées : 32 919.70 m³</td> </tr> </tbody> </table>	Diagnostic	Dépollution	Volume de terres à traiter : 25 848 m ³	Volume de terres traitées : 32 919.70 m ³																							
	Diagnostic	Dépollution																										
Volume de terres à traiter : 25 848 m ³	Volume de terres traitées : 32 919.70 m ³																											
<p>Le volume traité représente 26% supplémentaires par rapport aux estimations réalisées en phase de diagnostic.</p> <p>Cet écart entre diagnostic et dépollution n'inclut cependant pas les impacts résiduels, liés à l'impossibilité de poursuivre localement certains terrassements : atteinte de la nappe, présence d'ouvrages et des infrastructures de dépollution...</p> <p>Bilan massique (l'état initial inclut les découvertes en phase travaux) :</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Etat initial</th> <th>Etat final</th> <th>Bilan (% traités)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Volumes (m3)</td> <td>38 120</td> <td>5 200</td> <td>86%</td> </tr> <tr> <td>Tonnage (t)</td> <td>68 616</td> <td>9 360</td> <td>86%</td> </tr> <tr> <td>Concentration moyenne en HCT (mg/kgMS)</td> <td>10 800</td> <td>4 200</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>Tonnage HCT (t)</td> <td>741</td> <td>39</td> <td>95%</td> </tr> <tr> <td>Concentration moyenne en HAP (mg/kgMS)</td> <td>2 600</td> <td>1 350</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>Tonnage HAP (t)</td> <td>178</td> <td>13</td> <td>93%</td> </tr> </tbody> </table> <p>Les travaux ont donc permis le traitement de plus de 93% de la pollution présente initialement.</p> <p>Par contre, on note au final une sous-estimation de 32% du volume de terres polluées par rapport à la réalité du site.</p>		Etat initial	Etat final	Bilan (% traités)	Volumes (m3)	38 120	5 200	86%	Tonnage (t)	68 616	9 360	86%	Concentration moyenne en HCT (mg/kgMS)	10 800	4 200	-	Tonnage HCT (t)	741	39	95%	Concentration moyenne en HAP (mg/kgMS)	2 600	1 350	-	Tonnage HAP (t)	178	13	93%
	Etat initial	Etat final	Bilan (% traités)																									
Volumes (m3)	38 120	5 200	86%																									
Tonnage (t)	68 616	9 360	86%																									
Concentration moyenne en HCT (mg/kgMS)	10 800	4 200	-																									
Tonnage HCT (t)	741	39	95%																									
Concentration moyenne en HAP (mg/kgMS)	2 600	1 350	-																									
Tonnage HAP (t)	178	13	93%																									
Estimation locale (localisation des zones les plus polluées)	<p>Les principales découvertes de terres polluées en cours de travaux sont les suivantes :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Accumulation d'eaux d'infiltration chargées en créosote dans des sables et graviers sur le toit d'une couche argileuse de quelques dizaines de mètres d'extension. • Impacts des terres sous une ancienne canalisation d'hydrocarbures à 1.5-2 m de profondeur. 																											
Appréciation du donneur d'ordre sur ces résultats	<p>Une sous-estimation de 26% du volume de terres à traiter est tout à fait significative pour un tel projet.</p> <p>Avec du recul, le donneur d'ordre pense qu'il aurait mieux valu</p>																											

	<p>privilégier un plus grand nombre de sondages, plus rapprochés, quitte à faire moins d'analyse par sondage (1 tous les 2 m ?).</p> <p>Les découvertes en dépollution ont eu lieu à la périphérie de la zone identifiée, ce qu'un maillage plus resserré aurait pu mieux appréhender. Une mauvaise classification des sols dans la zone centrale vers 3-6m a aussi été observée, probablement liée au mode d'interpolation (ponctuelle, 1 analyse valant pour la maille).</p>
Appréciation du bureau d'étude/de la société de dépollution sur ces résultats	N/A
Impacts des écarts éventuels	<p>La principale conséquence de la sous-estimation de 26% est une augmentation du budget de dépollution, qui est passé de 3 à 4 millions. Cela a nécessité une renégociation avec les achats afin de justifier le surcoût et donc des soucis administratifs.</p> <p>Le délai de réalisation de la dépollution n'ayant pas été contraignant sur ce projet, le temps supplémentaire requis pour traiter les 26% de terres supplémentaires n'a pas été particulièrement pénalisant.</p>

Avis d'expert sur les raisons des écarts ou similitudes observés entre estimations de diagnostic et résultats de dépollution

Liste hiérarchisée des éléments pouvant expliquer les écarts ou la similitude des résultats	<p>La qualité du diagnostic avant travaux (maillage régulier et prélèvement d'échantillons homogènes tous les 50 cm) laisse à penser que les causes d'écart peuvent être les suivantes :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Existence d'impacts très localisés difficilement identifiables en phase de diagnostic, comme par exemple l'ancienne canalisation ; • Méthode d'interpolation ; cette dernière a été réalisée ponctuellement, sans prise en compte du changement de support entre échantillons ponctuels et maillage utilisé lors des excavations ; • Utilisation indépendante des résultats des différents diagnostics, les plus anciens ne servant qu'à rajouter localement des mailles impactées à l'estimation du volume à traiter.
Suggestion d'amélioration des estimations (diagnostic/dépollution)	<ul style="list-style-type: none"> • Envisager une meilleure intégration des données issues des différents diagnostics ; • Prendre en compte le changement de support lors de l'estimation des volumes impactés.

Références sur le site

Références pour les sites sans contrainte de confidentialité, publications, etc.	http://basol.developpement-durable.gouv.fr/fiche.php?page=6&index_sp=60.0095
--	---

Site F – Activité industrielle – TCE – Biodégradation in situ

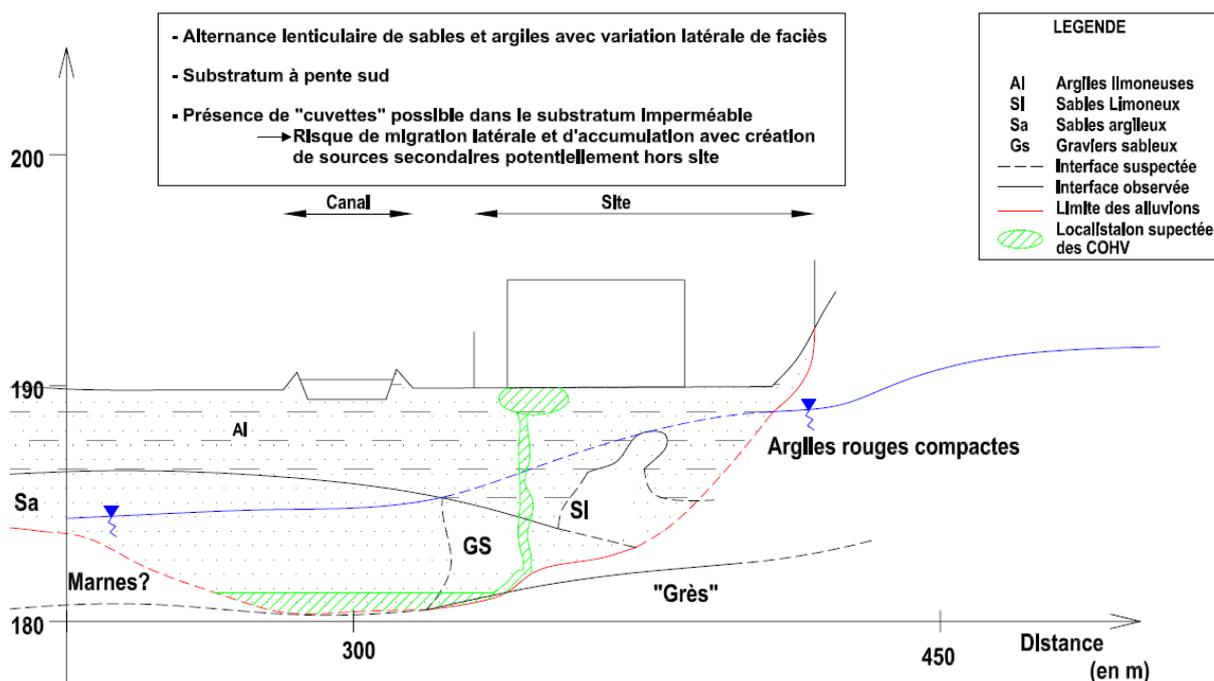


Figure 1 : Schéma conceptuel.

Caractéristiques générales		
Activité(s) à l'origine de la pollution	Dégraissages pièce mécaniques	
Période(s) et durée(s) d'activité	N/A	
Surface du site (parcelle(s))	≈ 1200-2000 m ²	
Types de substances justifiant une dépollution	Solvants chlorés	
Gammas de concentrations par milieu atteint (sol, eau souterraine, eau surface, air intérieur, sédiments,...)	Polluant principal : TCE dans la nappe	
	Phase	Diag initial
	Nombre	5
	Minimum	0.1 mg/l
	Moyenne	25 mg/l
	Médiane	4 mg/l
Types de terrains atteints par la pollution	Formation tertiaire	
	0-2.5 => all. argileux 2.5-10m => all. sableux	
Caractéristiques de la (des) nappe (s) atteinte (s) par la pollution	NS à -2.5 m/sol Epaisseur = 7.5 m, Aquifère K 10 ⁻⁵ m/s	

Occupation du site et de ses environs	Site en zone rurale, entouré de champs avec quelques habitations éparses
---------------------------------------	--

Etudes et travaux réalisés sur le site pollué	
2000-2001	Diagnostic approfondi Reconnaitances sonde MIP Contamination sol 0.6mg/kg MS Contamination eaux souterraines 100-300 mg/l
2003	Atelier de dissolution Enlèvement cuve Trichloréthylène de 15 m ³ Trace de solvants dans les sols autour de la cuve 0,5 mg/kg MS
2005	Traitement par injection oxydant Injection de 5 tonnes de KMnO ₄ en 3 campagnes Réalimentation panache => zone source suspectée
2005	Synthèse des investigations réalisées Etape A, B et B' de l'ESR Synthèse et expertise des travaux de dépollution
2006	IEM, Diag et EDR Définition et extension de la contamination => Anciennes cuves de solvants chlorés
2006-2007	Surveillance de nappe
2008-2010	Investigations complémentaires (forage, MIP, test terrain et labo) Plan de gestion
2010-2015	Traitement biologique anaérobie
2015-2018	> Surveillance après dépollution

Caractéristiques de la dépollution	
Type(s) de dépollution	in situ
Technique(s) de dépollution	Traitement biologique anaérobie
Description détaillée des objectifs fixés à la dépollution	Amélioration de la qualité générale des milieux : Deux seuils de réhabilitation pour la somme (TCE, Cis-DCE et CV) : 2.5 mg/l sur la majorité des ouvrages et 7 mg/l sur la totalité des ouvrages.

Estimations des quantités et localisation de la pollution en diagnostic									
Type de méthode d'estimation utilisée	Jugement d'expert								
Méthode précise d'estimation	Répartition des concentrations dans l'espace corrélée avec les zones de stockage, voies de transfert, le contexte hydrogéologique. Bilan massique sans plus d'information.								
Dimension									
Spécificités des données utilisées	<table border="1"> <tr> <td>Nombre</td> <td>5 (initial) + 17 (complémentaire)</td> </tr> <tr> <td>Types</td> <td>Analyses COHV en laboratoire</td> </tr> <tr> <td>Support</td> <td>Piézomètre, hauteur de la colonne d'eau.</td> </tr> <tr> <td>Répartition dans l'espace</td> <td>Répartition irrégulière au droit des installations</td> </tr> </table>	Nombre	5 (initial) + 17 (complémentaire)	Types	Analyses COHV en laboratoire	Support	Piézomètre, hauteur de la colonne d'eau.	Répartition dans l'espace	Répartition irrégulière au droit des installations
	Nombre	5 (initial) + 17 (complémentaire)							
	Types	Analyses COHV en laboratoire							
	Support	Piézomètre, hauteur de la colonne d'eau.							
Répartition dans l'espace	Répartition irrégulière au droit des installations								
Densité des données utilisées	1 donnée directe COHV pour 91 m ² 1 donnée directe COHV pour 682 m ³								
Données indirectes utilisées dans l'estimation ?	Non								

Estimations des quantités et localisation de la pollution en dépollution									
Méthode d'estimation utilisée	Jugement d'expert								
Spécificités des données utilisées	<table border="1"> <tr> <td>Nombre</td> <td>44</td> </tr> <tr> <td>Types</td> <td>Analyses COHV en laboratoire</td> </tr> <tr> <td>Support</td> <td>Piézomètre, prélèvement de la colonne d'eau.</td> </tr> <tr> <td>Répartition dans l'espace</td> <td>Répartition irrégulière au droit des installations</td> </tr> </table>	Nombre	44	Types	Analyses COHV en laboratoire	Support	Piézomètre, prélèvement de la colonne d'eau.	Répartition dans l'espace	Répartition irrégulière au droit des installations
	Nombre	44							
	Types	Analyses COHV en laboratoire							
	Support	Piézomètre, prélèvement de la colonne d'eau.							
Répartition dans l'espace	Répartition irrégulière au droit des installations								

Comparaison des estimations de diagnostic et résultats de dépollution					
Estimation globale (masses de polluants, volumes ou tonnages de terres par filière, etc...)	<table border="1"> <tr> <td>Diagnostic</td> <td>Dépollution</td> </tr> <tr> <td>Stade initial : 700-800 Kg Diag. Complém.: 150 Kg Bilan massique</td> <td>140 Kg Bilan massique</td> </tr> </table>	Diagnostic	Dépollution	Stade initial : 700-800 Kg Diag. Complém.: 150 Kg Bilan massique	140 Kg Bilan massique
	Diagnostic	Dépollution			
Stade initial : 700-800 Kg Diag. Complém.: 150 Kg Bilan massique	140 Kg Bilan massique				
Estimation locale (localisation des zones les plus polluées)	N/A				
Appréciation du donneur d'ordre	Satisfaction amélioration de la qualité des eaux souterraines				

sur ces résultats	
Appréciation du bureau d'étude/de la société de dépollution sur ces résultats	Objectifs validés
Impacts des écarts éventuels	

Avis d'expert sur les raisons des écarts ou similitudes observés entre estimations de diagnostic et résultats de dépollution	
Liste hiérarchisée des éléments pouvant expliquer les écarts ou la similitude des résultats	<ul style="list-style-type: none"> - Faible nombre d'analyses au stade du diagnostic initial, rendant inappropriée toute prédiction de masse de polluants. - Nature de la contamination, identifiée comme particulièrement complexe. - Raisonnement en [COHV] moyenne.
Suggestion d'amélioration des estimations (diagnostic/dépollution)	Le cas montre toute l'importance de disposer d'investigations détaillées et homogènes afin de quantifier correctement une masse de polluants.

Autres illustrations

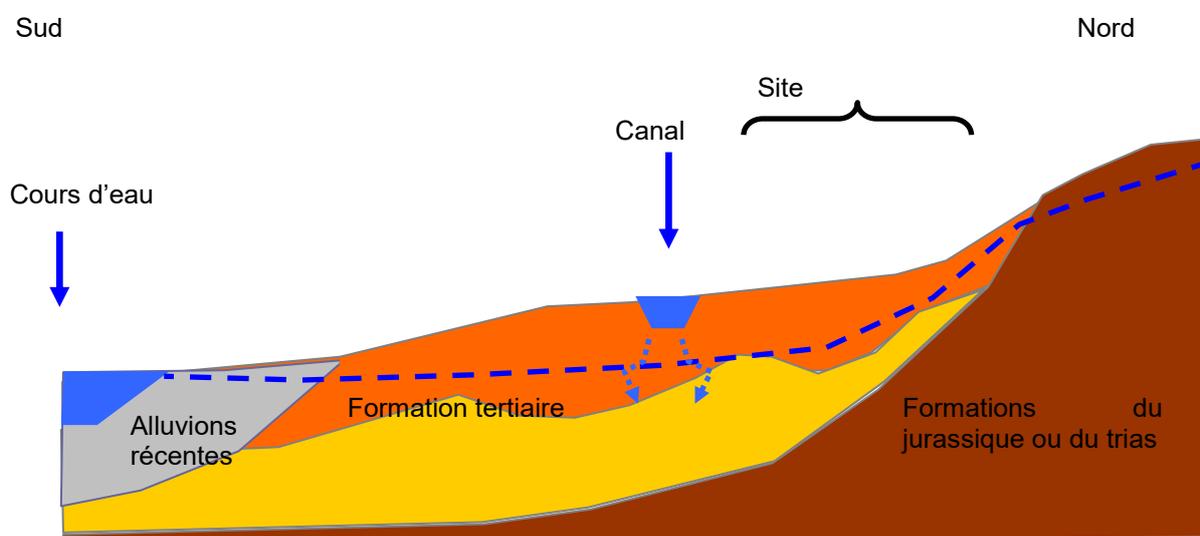


Figure 2 : Schéma conceptuel alternatif.

Site G – Dépôt pétrolier – Hydrocarbures – Excavation

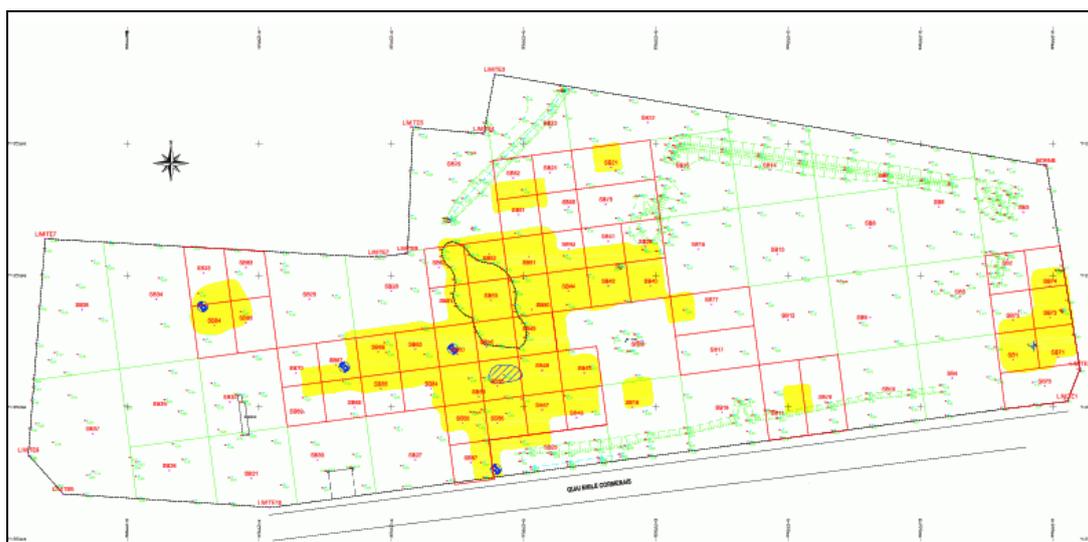


Figure 1 : Vue du site et extension de la pollution suite au diagnostic de 2002.

Caractéristiques générales	
Activité(s) à l'origine de la pollution – Période(s) d'activité	Ancien dépôt d'hydrocarbures démantelé en 2002 suite à la fin de son activité
Surface du site (parcelle(s))	46 600 m ²
Types de substances justifiant une dépollution	Hydrocarbures
Gammes de concentrations par milieu atteint (sol, eau souterraine, eau surface, air intérieur, sédiments,...)	Les valeurs maximales relevées dans les sols atteignent, au droit des zones impactées, 44 250 mg/kg _{MS} en HCT.
Types de terrains atteints par la pollution	<ul style="list-style-type: none"> • 1.5-2 m : remblais, • >2 m : argile saine peu perméable, présence locale de sables.
Caractéristiques de la (des) nappe (s) atteinte (s) par la pollution	Sans objet.
Occupation du site et de ses environs	Site en fin d'activité et installations démantelées.

Etudes et travaux réalisés sur le site pollué	
1996-2002	Levée de doute : plusieurs diagnostics légers ayant mis en évidence la présence d'une pollution significative qui a migré pour s'installer sur la base des remblais.
2002	Diagnostic complémentaire au droit des zones suspectes.
2005	Diagnostic complémentaire visant à préciser l'extension des zones contaminées. 82 sondages acquis selon un maillage de 15x15m au droit des zones suspectes et de 30x30m en dehors. Deux prélèvements d'approximativement 1m dans les remblais ou distinguant la hauteur visiblement saine de celle potentiellement impactée à la base des remblais ; 19 échantillons dans le terrain naturel sous-jacent.

2006	Investigations complémentaires suite à l'étude géostatistique : 17 sondages localisés dans les zones incertaines en périphérie de la zone contaminée.
2007	Dépollution

Caractéristiques de la dépollution

Type(s) de dépollution	Sur site avec excavation.
Technique(s) de dépollution	N/A
Description détaillée des objectifs fixés à la dépollution	Seuils de dépollution à atteindre, suite à l'EDR : <ul style="list-style-type: none"> Hydrocarbures totaux : 2500 mg/kg_{MS}

Estimations des quantités et localisation de la pollution en diagnostic

Type de méthode d'estimation utilisée	Déterministe + géostatistique								
Méthode précise d'estimation	<ul style="list-style-type: none"> <u>Estimation déterministe</u> basée sur les hauteurs d'échantillons ayant donné lieu à des teneurs non compatibles multipliées par la taille de la maille. <u>Modélisation géostatistique</u> consistant en une modélisation de la géométrie de la couche potentiellement impactée, combinée avec une estimation de la probabilité de dépassement du seuil 2500 mg/kg_{MS}. Cette approche en deux étapes découle du protocole de prélèvement (voir ci-dessous) <p>NB : La modélisation géostatistique a été réalisée avant le diagnostic de 2006 et a conduit précisément à la recommandation d'investigations complémentaires. Cette modélisation n'a été mise à jour qu'après la dépollution, dans le cadre des travaux du GT GeoSiPol.</p>								
Spécificités des données utilisées	<p>Seuls les résultats basés sur l'ensemble des données acquises en 2005 et 2006, avant la dépollution, sont discutés. Les données plus anciennes ont été ignorées lors de la modélisation en raison de différences de protocoles et du recouvrement des zones par la campagne de 2005.</p> <table border="1"> <tr> <td>Nombre</td> <td>99 sondages, 198 analyses</td> </tr> <tr> <td>Types</td> <td>Analyse HCT (C10-C40)..</td> </tr> <tr> <td>Support</td> <td>Tarière de 60 mm. Prélèvements : <ul style="list-style-type: none"> homogènes d'approx. 1m en l'absence d'indication visuelle de pollution. En présence d'indication visuelle, prélèvement d'1 échantillon au-dessus et d'1 dans la partie des remblais impactée. En présence d'indication visuelle sur toute la hauteur des remblais, prélèvement d'un échantillon moyen dans les remblais et d'un échantillon dans le terrain sous-jacent. </td> </tr> <tr> <td>Répartition dans l'espace</td> <td>Maillage régulier 15m x 15m, élargi à 30m x 20m en dehors de la zone potentiellement impactée.</td> </tr> </table>	Nombre	99 sondages, 198 analyses	Types	Analyse HCT (C10-C40)..	Support	Tarière de 60 mm. Prélèvements : <ul style="list-style-type: none"> homogènes d'approx. 1m en l'absence d'indication visuelle de pollution. En présence d'indication visuelle, prélèvement d'1 échantillon au-dessus et d'1 dans la partie des remblais impactée. En présence d'indication visuelle sur toute la hauteur des remblais, prélèvement d'un échantillon moyen dans les remblais et d'un échantillon dans le terrain sous-jacent. 	Répartition dans l'espace	Maillage régulier 15m x 15m, élargi à 30m x 20m en dehors de la zone potentiellement impactée.
Nombre	99 sondages, 198 analyses								
Types	Analyse HCT (C10-C40)..								
Support	Tarière de 60 mm. Prélèvements : <ul style="list-style-type: none"> homogènes d'approx. 1m en l'absence d'indication visuelle de pollution. En présence d'indication visuelle, prélèvement d'1 échantillon au-dessus et d'1 dans la partie des remblais impactée. En présence d'indication visuelle sur toute la hauteur des remblais, prélèvement d'un échantillon moyen dans les remblais et d'un échantillon dans le terrain sous-jacent. 								
Répartition dans l'espace	Maillage régulier 15m x 15m, élargi à 30m x 20m en dehors de la zone potentiellement impactée.								
Données indirectes utilisées dans l'estimation ?	Non.								

Estimations des quantités et localisation de la pollution en dépollution

Méthode d'estimation utilisée	Relevés organoleptiques et analyses de contrôle
Spécificités des données utilisées	Contrôles en bord et fond de fouille d'échantillons composites pour analyse en laboratoire, extension des fouilles par tranches de 5m latéralement en cas de résultats non conformes.

Comparaison des estimations de diagnostic et résultats de dépollution

Estimation globale (masses de polluants, volumes ou tonnages de terres par filière, etc...)	<table border="1"><thead><tr><th>Diagnostic</th><th>Dépollution</th></tr></thead><tbody><tr><td>Volume de terres à traiter :<ul style="list-style-type: none">Déterministe : 8 292 m³Géostat sans effet de support : 9 217 m³ IC90%=[7 874 ; 11 265]Géostat avec effet de support : 12 059 m³ IC90%=[10 028 ; 15 421]</td><td>Volume de terres traitées : 13 171 m³</td></tr></tbody></table>	Diagnostic	Dépollution	Volume de terres à traiter : <ul style="list-style-type: none">Déterministe : 8 292 m³Géostat sans effet de support : 9 217 m³ IC90%=[7 874 ; 11 265]Géostat avec effet de support : 12 059 m³ IC90%=[10 028 ; 15 421]	Volume de terres traitées : 13 171 m ³
	Diagnostic	Dépollution			
Volume de terres à traiter : <ul style="list-style-type: none">Déterministe : 8 292 m³Géostat sans effet de support : 9 217 m³ IC90%=[7 874 ; 11 265]Géostat avec effet de support : 12 059 m³ IC90%=[10 028 ; 15 421]	Volume de terres traitées : 13 171 m ³				
Le volume traité a été sous-estimé de 37% par l'approche déterministe. Sans prise en compte de l'effet de support (maillage 15m x 15m en excavation), l'approche géostatistique se rapproche très légèrement de la valeur réelle. La prise en compte de l'effet de support réduit la sous-estimation à 9% du volume traité. En outre, ce volume réel est bien compris dans l'intervalle de confiance associé à l'estimation géostatistique. Il correspond en fait au quantile 25% de la distribution du volume estimé, i.e. il y avait même un risque de 25% d'avoir un volume réel encore plus élevé.					
Estimation locale (localisation des zones les plus polluées)	Cohérence des zones excavées avec l'identification des mailles présentant un risque important de dépassement de seuil (voir Figure)				
Appréciation du donneur d'ordre sur ces résultats	Sous-estimation non négligeable de l'estimation déterministe ainsi que du modèle géostatistique initial, réalisé avant l'acquisition des 17 sondages complémentaires et sans prendre en compte le maillage d'excavation (effet de support), inconnu à l'époque. La prise en compte de l'effet de support, réalisée a posteriori à des fins de compréhension des écarts, a vraiment remis en cohérence l'estimation de volumes contaminés avec les terres polluées excavées.				
Appréciation du bureau d'étude/de la société de dépollution sur ces résultats					
Impacts des écarts éventuels	Sans objet.				

Avis d'expert sur les raisons des écarts ou similitudes observés entre estimations de diagnostic et résultats de dépollution

Liste hiérarchisée des éléments pouvant expliquer les écarts ou la similitude des résultats	<ul style="list-style-type: none">Le protocole de prélèvement du diagnostic de 2005 était basé sur l'hypothèse d'une couche potentiellement polluée en base des remblais. Cela a orienté la modélisation géostatistique et aurait pu s'avérer problématique si l'hypothèse s'était avérée partiellement infondée.La modélisation déterministe, en ne comptabilisant en volume pollué que les hauteurs de prélèvement analysées et supérieures au seuil de dépollution, conduit à sous-estimer très significativement le volume pollué.La prise en compte de l'effet de support (différence entre
---	--

	sondages de diagnostic et maillage d'excavation) lors de la modélisation géostatistique a permis de fournir une estimation plus réaliste des volumes contaminés, en assortissant en outre cette dernière d'une quantification de l'incertitude.
Suggestion d'amélioration des estimations (diagnostic/dépollution)	<ul style="list-style-type: none"> • Lorsqu'une excavation des matériaux est envisagée, se méfier d'estimations de volumes contaminés basées sur des modélisations des teneurs ponctuelles. Prendre en compte l'effet de support dès la modélisation initiale est crucial. • Il importe d'avoir conscience que certaines stratégies d'investigation vont de facto limiter le choix des techniques d'estimation et impacter les hypothèses de modélisation. • Le cas souligne en outre l'intérêt de la géostatistique dans un but d'optimisation des investigations.

Références sur le site

Références pour les sites sans contrainte de confidentialité, publications, etc.	GeoSiPol – Etudes de démonstration (2008)
--	---

Autres illustrations

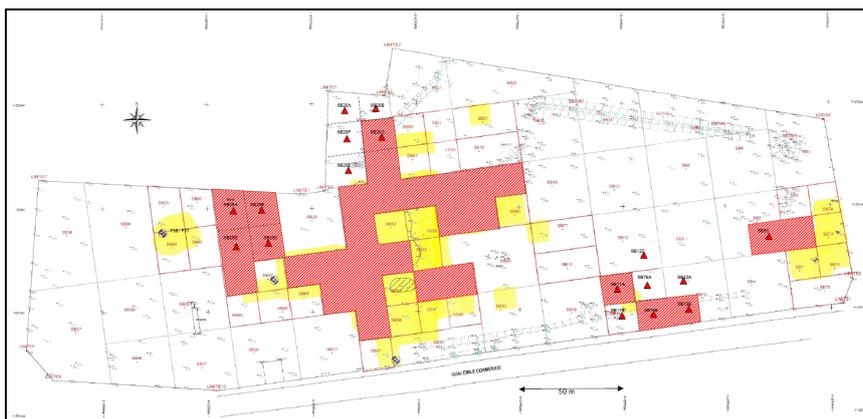


Figure 2 : Localisation des 17 sondages complémentaires réalisés en juin 2006. Identification des mailles non compatibles correspondantes (en rouge), par rapport à l'extension initiale de 2005 (jaune).

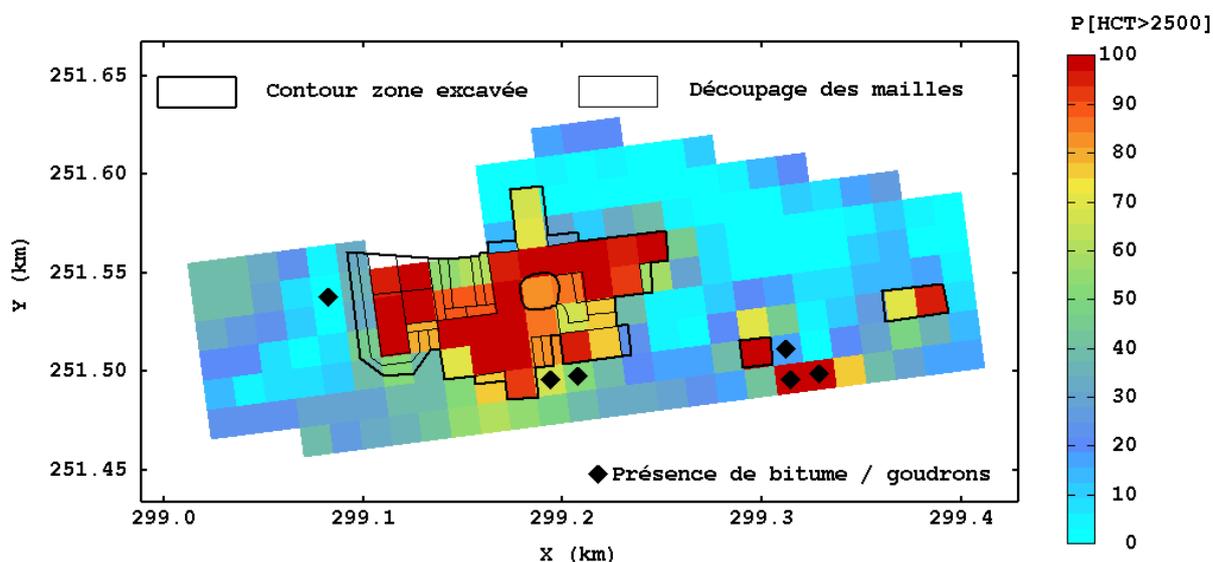
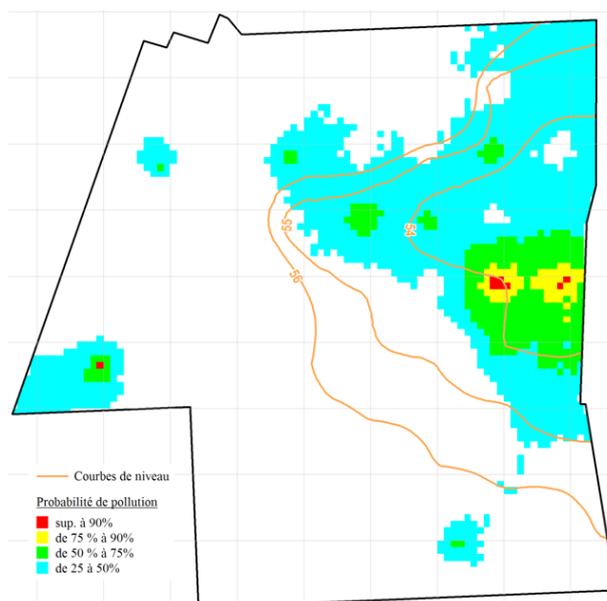


Figure 3 : Superposition de la carte de probabilité de dépassement du seuil de 2500 ppm en HCT et des contours de la zone excavée ainsi que des mailles irrégulières réalisées.

Site H - Ancienne activité industrielle – HAP, Benz(a)pyrène et Naphtalène – Excavation



<i>Caractéristiques générales</i>	
Activité(s) à l'origine de la pollution – Période(s) d'activité	Production de gaz depuis 1949 jusqu'aux années 1970 puis atelier municipal
Surface du site (parcelle(s))	6 200 m ²
Types de substances justifiant une dépollution	HAP (Naphtalène, Benzo(a)pyrène), BTEX (Benzène)
Gammes de concentrations par milieu atteint (sol, eau souterraine, eau surface, air intérieur, sédiments,...)	Sols : HAP : 10 – 2000 mg/kg, BAP : 3 – 140 mg/kg, BTEX : 130-200 mg/kg, Benzène : 3 – 246 mg/kg Eaux souterraines : Naphtalène : 44 µg/l, BAP : 0.08 µg/l Gas de sols : BTEX 0.06 mg/m ³
Types de terrains atteints par la pollution	Remblais sablo graveleux entre 1 et 3 m puis limons argileux
Caractéristiques de la (des) nappe (s) atteinte (s) par la pollution	Nappe présente entre 2 et 5 m de profondeur.
Occupation du site et de ses environs	Quartier pavillonnaire

<i>Etudes et travaux réalisés sur le site pollué</i>	
2006	Diagnostic des sols
2007	Etudes des eaux souterraines
2007	Etude Géostatistiques, Etude des risques sanitaires, Options pour la dépollution des sites, Etude de l'évacuation du sol.
2008	Travaux puis Dossier de récolement des travaux de dépollution

Caractéristiques de la dépollution

Type(s) de dépollution	Excavation			
Technique(s) de dépollution				
Description détaillée des objectifs fixés à la dépollution		BAP	NAPH	HAP
	Seuil de contamination	3,5 mg/kg (VDSS)	23 mg/kg (VDSS)	50 mg/kg
	CET de classe 2	entre 1 et 5 mg/kg		entre 50 et 100 mg/kg
	CET de classe 1	sup. à 5 mg/kg	sup. à 20 mg/kg	entre 100 et 500 mg/kg
	Incinérateur			sup. à 500 mg/kg

Estimations des quantités et localisation de la pollution en diagnostic

Type de méthode d'estimation utilisée	Géostatistique	
Méthode précise d'estimation	Simulations conditionnelles par bandes tournantes Grille 1 m	
Spécificités des données utilisées	Nombre	61 sondages / 221 échantillons Somme HAP, Naphtalène, Benzo(a)pyrène
	Types	Sondages carottés
	Support	Echantillons par rainurage tous les m de sondage
	Répartition dans l'espace	Homogène : au centre de mailles carrées 10 m x 10 m
Données indirectes utilisées dans l'estimation ?	Non	
Points spécifiques géostatistiques	Transformation logarithmique et anamorphose gaussienne	

Estimations des quantités et localisation de la pollution en dépollution

Méthode d'estimation utilisée	Contrôle / tri des terres. par un géologue expérimenté. Analyses de sols de paroi et fouilles
Spécificités des données utilisées	

Comparaison des estimations de diagnostic et résultats de dépollution

Estimation globale (masses de polluants, volumes ou tonnages de terres par filière, etc...)		Diagnostic	Dépollution
	CET 2	2 105 t	5 686 t
	CET 1	7 973 t	1 418 t
	Incinérateur	1 228 t	2 414 t
	Total	11 305 t	9 518 t
Estimation locale (localisation des zones les plus polluées)	Non renseigné.		
Appréciation du donneur d'ordre sur ces résultats	Le cout total des sols mis en CET1 été surestimé dans le montage financier de l'opération. Ces montants inutilisés sont, certes « un gain » en fin de projet, mais ils auraient pu bénéficier au projet		

	architectural global. Il faut améliorer les procédures d'estimation des volumes de sols pollués géostatistique ou autre.
Appréciation du bureau d'étude/de la société de dépollution sur ces résultats	Tonnage global bien estimé, inversion de répartition des tonnages entre les deux CET, volume incinéré double de la prédiction
Impacts des écarts éventuels	Pas de surcoût vu que les écarts de classification ont joué dans le bon sens (plus de volumes dans les filières moins coûteuses).

Avis d'expert sur les raisons des écarts ou similitudes observés entre estimations de diagnostic et résultats de dépollution

<p>Liste hiérarchisée des éléments pouvant expliquer les écarts ou la similitude des résultats</p>	<p>Différence entre le support de modélisation utilisé pour les simulations, de 1 m de côté horizontalement et le support d'excavation, qui correspondrait approximativement à une maille de 10 m.</p> <p>Un calcul complémentaire à maille 10 m a été effectué mais n'a pas permis d'expliquer ces différences.</p>																																										
	<table border="1"> <caption>Données estimées du histogramme</caption> <thead> <tr> <th>HAP</th> <th>Maille 1m</th> <th>Maille 10m</th> <th>CET2</th> <th>CET1</th> <th>Incinérateur</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>4</td><td>0.008</td><td>0.025</td><td>0.015</td><td>0.019</td><td>0.000</td></tr> <tr><td>5</td><td>0.008</td><td>0.016</td><td>0.016</td><td>0.018</td><td>0.000</td></tr> <tr><td>6</td><td>0.000</td><td>0.013</td><td>0.003</td><td>0.023</td><td>0.000</td></tr> <tr><td>7</td><td>0.000</td><td>0.009</td><td>0.005</td><td>0.014</td><td>0.011</td></tr> <tr><td>8</td><td>0.000</td><td>0.000</td><td>0.000</td><td>0.000</td><td>0.002</td></tr> <tr><td>9</td><td>0.000</td><td>0.000</td><td>0.000</td><td>0.000</td><td>0.002</td></tr> </tbody> </table>	HAP	Maille 1m	Maille 10m	CET2	CET1	Incinérateur	4	0.008	0.025	0.015	0.019	0.000	5	0.008	0.016	0.016	0.018	0.000	6	0.000	0.013	0.003	0.023	0.000	7	0.000	0.009	0.005	0.014	0.011	8	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	9	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002
HAP	Maille 1m	Maille 10m	CET2	CET1	Incinérateur																																						
4	0.008	0.025	0.015	0.019	0.000																																						
5	0.008	0.016	0.016	0.018	0.000																																						
6	0.000	0.013	0.003	0.023	0.000																																						
7	0.000	0.009	0.005	0.014	0.011																																						
8	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002																																						
9	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002																																						
	<p>Il est vraisemblable que les écarts observés soient liés au protocole d'excavation adaptatif utilisé par le groupe sur ses chantiers. En effet, l'ingénieur ajuste en temps réel sur le terrain sa maille d'excavation (front de taille et profondeur) en fonction de ses mesures in situ (géologie, odeur, couleur, et mesure PID) :</p> <ul style="list-style-type: none"> • La maille carrée 10 x 10 x 1 du modèle géostatistique n'est localement pas respectée ; • Les fortes pollutions ne sont alors plus moyennées avec des sols environnants ce qui explique le doublement des volumes incinérés au détriment de la mise en CET de classe 1 ; • Les teneurs de réconciliation sont issues des résultats de l'échantillonnage des bennes de camions par le CET. 																																										
	<p>D'autres facteurs ont participé aussi à ces différences : dépollution des bordures du site, excavation en forme de puits...</p>																																										
<p>Suggestion d'amélioration des estimations (diagnostic/dépollution)</p>	<p>- Il faudrait idéalement pouvoir prendre en compte lors de l'estimation des volumes le protocole d'excavation adaptatif, ce qui semble pourtant difficilement envisageable.</p>																																										

Références sur le site

Références pour les sites sans
contrainte de confidentialité,
publications, etc.

Confidentiel.

Site I – Dépôt pétrolier – HCT/BTEX – Excavation + bioterre

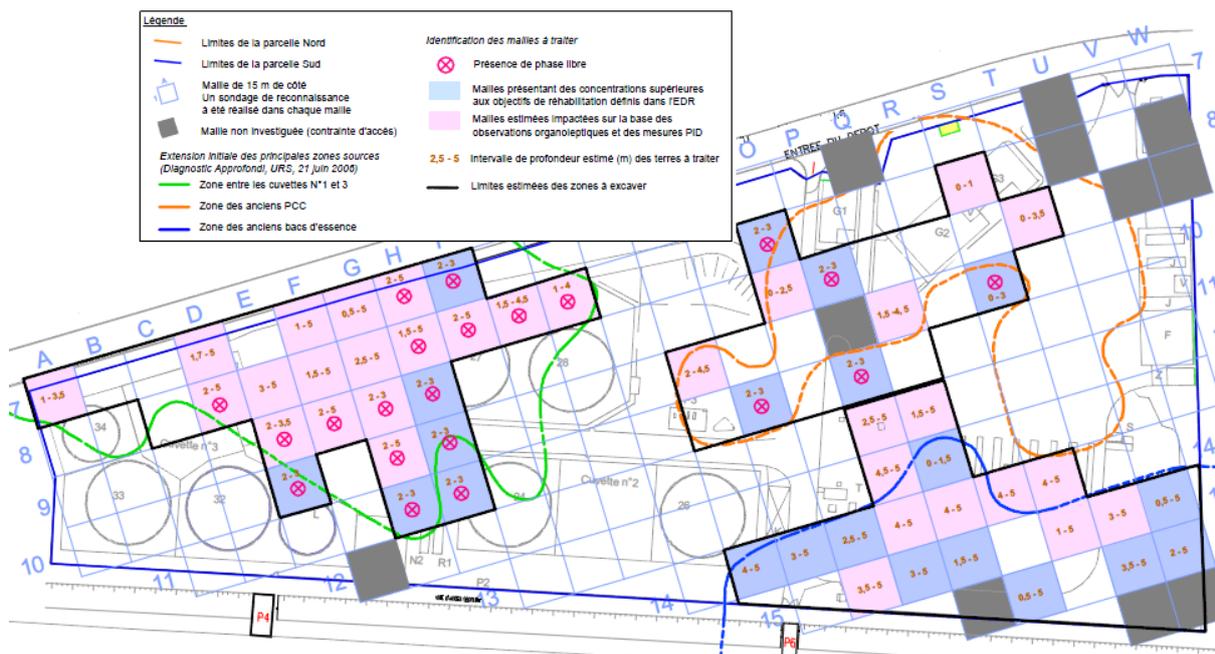


Figure 1 : Maillage du site (15m x 15m) et localisation des zones à excaver sur base de l'approche déterministe.

Caractéristiques générales	
Activité(s) à l'origine de la pollution – Période(s) d'activité	Ancien dépôt pétrolier exploité depuis les années 1950 et jusqu'en 2000. Démantèlement des infrastructures et installations en 2005.
Surface du site (parcelle(s))	36 000 m ²
Types de substances justifiant une dépollution	<ul style="list-style-type: none"> Hydrocarbures (fioul lourd, domestique, gazole, supercarburant) et stockage de produits chimiques ; Métaux : bruit de fond dans les remblais (non adressé ici).
Gammes de concentrations par milieu atteint (sol, eau souterraine, eau surface, air intérieur, sédiments,...)	Les valeurs maximales relevées dans les sols atteignent, au droit des zones impactées : <ul style="list-style-type: none"> 75 000 mg/kg_{MS} en HCT, 700 mg/kg_{MS} en BTEX, 11 000 mg/kg_{MS} en HAP.
Types de terrains atteints par la pollution	<ul style="list-style-type: none"> 0-2 m : remblais (épaisseur max 4.4 m) constitués principalement de sables argileux, 2-15 m : alluvions (silts et sables).
Caractéristiques de la (des) nappe (s) atteinte (s) par la pollution	Toit de la nappe entre 4 et 5 m de profondeur. Dôme piézométrique au droit du site. Pas d'exploitation de la nappe superficielle des alluvions pour l'eau potable en raison de sa qualité médiocre.
Occupation du site et de ses environs	Site en fin d'activité et installations démantelées.

Etudes et travaux réalisés sur le site pollué	
1994-2002	Premiers diagnostics de sols, diagnostic initial, évaluation simplifiée des risques, dossier de cessation d'activité.
2006	Diagnostic approfondi : 156 sondages à la pelle mécanique selon un

	maillage de 15m x 15m, ayant conduit à l'analyse de 486 échantillons de sol. Une dizaine de mailles n'a pu être investiguée en raison de la présence d'encombrants.
2010	Dépollution

Caractéristiques de la dépollution

Type(s) de dépollution	Excavation selon un maillage de 10m x 10m + traitement biologique sur site et hors site. Réalisation préliminaire de sondages de reconnaissance complémentaires.										
Technique(s) de dépollution	<ul style="list-style-type: none"> Traitement biologique « sur site » des terres impactées par des hydrocarbures (biotertres ou landfarming), Elimination en filière de traitement « hors site » des lots de matériaux impactés par des HAP. 										
Description détaillée des objectifs fixés à la dépollution	Seuils de dépollution à atteindre, suite à l'EDR, pour les trois zones impactées : <table border="1" data-bbox="632 763 1401 927"> <thead> <tr> <th>Substances</th> <th>Objectifs de dépollution sur matériaux bruts (en mg/kg de MS)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Benzène</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>Xylènes</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>Hydrocarbures totaux (GC. C₅-C₁₀)</td> <td>25</td> </tr> <tr> <td>Hydrocarbures totaux (GC. C₁₀-C₄₀)</td> <td>5 000</td> </tr> </tbody> </table>	Substances	Objectifs de dépollution sur matériaux bruts (en mg/kg de MS)	Benzène	1	Xylènes	5	Hydrocarbures totaux (GC. C ₅ -C ₁₀)	25	Hydrocarbures totaux (GC. C ₁₀ -C ₄₀)	5 000
Substances	Objectifs de dépollution sur matériaux bruts (en mg/kg de MS)										
Benzène	1										
Xylènes	5										
Hydrocarbures totaux (GC. C ₅ -C ₁₀)	25										
Hydrocarbures totaux (GC. C ₁₀ -C ₄₀)	5 000										

Estimations des quantités et localisation de la pollution en diagnostic

Type de méthode d'estimation utilisée	Déterministe + géostatistique, focalisée sur les HCT et BTEX.								
Méthode précise d'estimation	<ul style="list-style-type: none"> <u>Estimation déterministe</u> basée sur les hauteurs d'échantillons ayant donné lieu à des teneurs non compatibles multipliées par la taille de la maille. <u>Modélisation géostatistique</u> consistant en une modélisation 3D des teneurs en HCT, Benzène et Xylènes, selon un maillage fin de 2.5 x 2.5 x 0.5 m, sans modélisation du changement de support entre données de diagnostic et maillage de dépollution. 								
Spécificités des données utilisées	Seules les données de l'EDR ont été retenues pour l'estimation des volumes de terres polluées. <table border="1" data-bbox="632 1406 1358 1727"> <tr> <td>Nombre</td> <td>156 sondages, 486 analyses</td> </tr> <tr> <td>Types</td> <td>Analyse HCT, BTEX, quelques analyses HAP, mesures PID tous les mètres.</td> </tr> <tr> <td>Support</td> <td>Pelle mécanique. 3 prélèvements par sondage, focalisés sur les passes métriques d'intérêt suite à la mesure PID et aux indices organoleptiques.</td> </tr> <tr> <td>Répartition dans l'espace</td> <td>Maillage régulier 15m x 15m.</td> </tr> </table>	Nombre	156 sondages, 486 analyses	Types	Analyse HCT, BTEX, quelques analyses HAP, mesures PID tous les mètres.	Support	Pelle mécanique. 3 prélèvements par sondage, focalisés sur les passes métriques d'intérêt suite à la mesure PID et aux indices organoleptiques.	Répartition dans l'espace	Maillage régulier 15m x 15m.
Nombre	156 sondages, 486 analyses								
Types	Analyse HCT, BTEX, quelques analyses HAP, mesures PID tous les mètres.								
Support	Pelle mécanique. 3 prélèvements par sondage, focalisés sur les passes métriques d'intérêt suite à la mesure PID et aux indices organoleptiques.								
Répartition dans l'espace	Maillage régulier 15m x 15m.								
Données indirectes utilisées dans l'estimation ?	Relevés organoleptiques et mesures PID intégrés de manière qualitative dans l'estimation déterministe des volumes.								

Estimations des quantités et localisation de la pollution en dépollution

Méthode d'estimation utilisée	Relevés organoleptiques et analyses de contrôle
Spécificités des données utilisées	Contrôles en bord et fond de fouille d'échantillons pour analyse en laboratoire. Excavation a posteriori d'une pollution résiduelle identifiée lors des travaux.

Comparaison des estimations de diagnostic et résultats de dépollution

<p>Estimation globale (masses de polluants, volumes ou tonnages de terres par filière, etc...)</p>	<p>La comparaison des volumes à traiter correspond exclusivement aux deux zones impactées 1-3 et PCC (hors zone des anciens bacs d'essence).</p> <table border="1" data-bbox="630 365 1358 517"> <thead> <tr> <th data-bbox="630 365 994 409">Diagnostic</th> <th data-bbox="994 365 1358 409">Dépollution</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="630 409 994 517"> Volume de terres à traiter (approche déterministe) : 21 400 m³ </td> <td data-bbox="994 409 1358 517"> Volume de terres traitées 1-3 : 28 537 m³ </td> </tr> </tbody> </table> <p>Le volume traité a été sous-estimé de 25% par l'approche déterministe. L'estimation géostatistique des volumes à traiter a été réalisée avec des seuils différents de ceux finalement retenus. Pour ces seuils préliminaires, l'approche géostatistique, menée sans prise en compte de l'effet du support, a conduit à des estimations proches de la méthode déterministe. Pour autant, elle a permis d'évaluer l'incertitude associée à l'estimation des volumes à environ 25%.</p> <p>La problématique des HAP a été gérée à part via un traitement hors site sans qu'une comparaison soit possible avec l'estimation en phase diagnostic, non menée pour ces composés.</p> <p>Une évaluation à la fois déterministe et géostatistique a été faite des volumes de terre à excaver afin d'accéder aux terres à traiter. Aucune comparaison avec les résultats en dépollution n'étant possible, ces volumes ne sont pas détaillés.</p>	Diagnostic	Dépollution	Volume de terres à traiter (approche déterministe) : 21 400 m ³	Volume de terres traitées 1-3 : 28 537 m ³
Diagnostic	Dépollution				
Volume de terres à traiter (approche déterministe) : 21 400 m ³	Volume de terres traitées 1-3 : 28 537 m ³				
<p>Estimation locale (localisation des zones les plus polluées)</p>	<p>N/A</p>				
<p>Appréciation du donneur d'ordre sur ces résultats</p>	<p>Sous-estimation non négligeable de l'estimation déterministe ainsi que du modèle géostatistique initial (sans effet de support).</p>				
<p>Appréciation du bureau d'étude/de la société de dépollution sur ces résultats</p>					
<p>Impacts des écarts éventuels</p>	<p>N/A</p>				

Avis d'expert sur les raisons des écarts ou similitudes observés entre estimations de diagnostic et résultats de dépollution

<p>Liste hiérarchisée des éléments pouvant expliquer les écarts ou la similitude des résultats</p>	<ul style="list-style-type: none"> - La modélisation déterministe, en ne comptabilisant en volume pollué que les hauteurs de prélèvement analysées et supérieures au seuil de dépollution, conduit à sous-estimer très significativement le volume pollué.
<p>Suggestion d'amélioration des estimations (diagnostic/dépollution)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Lorsqu'une excavation des matériaux est envisagée, se méfier d'estimations de volumes contaminés basées sur des modélisations des teneurs ponctuelles. - Il est crucial de prendre en compte l'effet de support dès la modélisation initiale, ce point constituant un intérêt fort de l'approche géostatistique.

Site J – Ancienne chaufferie – Hydrocarbures – Excavation + Bioremédiation in situ

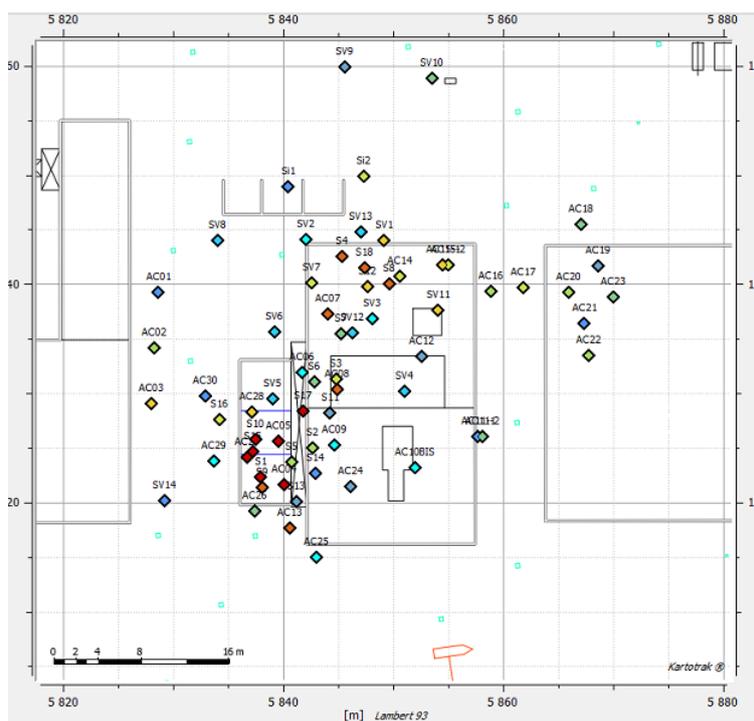


Figure 1 Schéma de la zone source et des sondages de diagnostic (SV1 à V14 ?) et AC01 à AC30) et de suivi du traitement biologique in situ (S1 à S18).

Caractéristiques générales	
Activité(s) à l'origine de la pollution – Période(s) d'activité	Ancienne chaufferie
Surface du site (parcelle(s))	~1000 m ² (zone source traitée)
Types de substances justifiant une dépollution	Hydrocarbures pétroliers
Gammes de concentrations par milieu atteint (sol, eau souterraine, eau surface, air intérieur, sédiments,...)	7000 ppm de C10-C40
Types de terrains atteints par la pollution	Remblais (0-6 m) investigués seulement
Caractéristiques de la (des) nappe (s) atteinte (s) par la pollution	Nappe à 6 m de profondeur
Occupation du site et de ses environs	Centrale de production d'électricité

Etudes et travaux réalisés sur le site pollué	
2006	1 ^{ère} campagne de caractérisation (sondages SVxx)
2009	2 ^{de} campagne de caractérisation (sondages AC01-AC25)
2010	Etude géostatistique
Août 2010	Sondages complémentaires réalisés suite aux recommandations fournies par l'étude géostatistique (AC26-AC30). Mise à jour de l'étude géostatistique.
2013-2015	Traitement par bioremédiation (peu efficace) Acquisition de nouvelles données dans de nouveaux sondages (S1 à

	S18) Excavation de la pollution résiduelle
--	---

<i>Caractéristiques de la dépollution</i>	
Type(s) de dépollution	Traitement biologique in situ (2013-2015) + Excavation
Technique(s) de dépollution	Bioventing (?)
Description détaillée des objectifs fixés à la dépollution	Objectif : 500 mg / kg ms en indice hydrocarbures totaux (HCT)

<i>Estimations des quantités et localisation de la pollution en diagnostic</i>											
Type de méthode d'estimation utilisée	Géostatistique										
Méthode précise d'estimation	Anisotropie horizontale / verticale prise en compte, portée courte de l'ordre de 5-7 m Données régularisées Krigeage de blocs (voir carte ci-dessous), maille 50 cm de côté (verticalement ??) Probabilité de dépassement de seuil à partir d'un krigeage d'indicatrices (2 seuils : 2000 et 500 ppm) Interpolation jusqu'à 7 m de profondeur (bas des sondages)										
Spécificités des données utilisées	2 campagnes de caractérisation : <ul style="list-style-type: none"> - Sondages SV en 2006 - Sondages AC01-AC25 en 2009 - Sondages complémentaires en 2011 : AC26-AC30 <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 15%;">Nombre</td> <td><u>Zone de l'ancienne chaufferie (seule zone dépolluée :</u> - 37 sondages, avec 25 échantillons analysés lors de la première campagne + 67 échantillons lors de la deuxième, soit 92 au total. - 5 sondages complémentaires en 2010. Nombre d'échantillons complémentaires inconnu.</td> </tr> <tr> <td></td> <td><u>Zone des transformateurs nord et sud.</u> - 13 sondages, avec 34 échantillons analysés lors de la deuxième campagne. - 12 sondages complémentaires dans la zone des transformateurs sud en 2010. Nombre d'échantillons complémentaires inconnu.</td> </tr> <tr> <td>Types</td> <td>Indice hydrocarbures totaux analysés au laboratoire (HCT)</td> </tr> <tr> <td>Support</td> <td>Sondages à la tarière, prélevés tous les mètres, puis sélectionnés par lecture PID ou d'indices organoleptiques de leur contamination pour analyse des hydrocarbures totaux (HCT) en laboratoire.</td> </tr> <tr> <td>Répartition dans l'espace</td> <td>Échantillonnage moyen tous les 5 m dans le plan horizontal, non régulier. Répartition en trois zones distinctes, dont celle de la chaufferie.</td> </tr> </table>	Nombre	<u>Zone de l'ancienne chaufferie (seule zone dépolluée :</u> - 37 sondages, avec 25 échantillons analysés lors de la première campagne + 67 échantillons lors de la deuxième, soit 92 au total. - 5 sondages complémentaires en 2010. Nombre d'échantillons complémentaires inconnu.		<u>Zone des transformateurs nord et sud.</u> - 13 sondages, avec 34 échantillons analysés lors de la deuxième campagne. - 12 sondages complémentaires dans la zone des transformateurs sud en 2010. Nombre d'échantillons complémentaires inconnu.	Types	Indice hydrocarbures totaux analysés au laboratoire (HCT)	Support	Sondages à la tarière, prélevés tous les mètres, puis sélectionnés par lecture PID ou d'indices organoleptiques de leur contamination pour analyse des hydrocarbures totaux (HCT) en laboratoire.	Répartition dans l'espace	Échantillonnage moyen tous les 5 m dans le plan horizontal, non régulier. Répartition en trois zones distinctes, dont celle de la chaufferie.
Nombre	<u>Zone de l'ancienne chaufferie (seule zone dépolluée :</u> - 37 sondages, avec 25 échantillons analysés lors de la première campagne + 67 échantillons lors de la deuxième, soit 92 au total. - 5 sondages complémentaires en 2010. Nombre d'échantillons complémentaires inconnu.										
	<u>Zone des transformateurs nord et sud.</u> - 13 sondages, avec 34 échantillons analysés lors de la deuxième campagne. - 12 sondages complémentaires dans la zone des transformateurs sud en 2010. Nombre d'échantillons complémentaires inconnu.										
Types	Indice hydrocarbures totaux analysés au laboratoire (HCT)										
Support	Sondages à la tarière, prélevés tous les mètres, puis sélectionnés par lecture PID ou d'indices organoleptiques de leur contamination pour analyse des hydrocarbures totaux (HCT) en laboratoire.										
Répartition dans l'espace	Échantillonnage moyen tous les 5 m dans le plan horizontal, non régulier. Répartition en trois zones distinctes, dont celle de la chaufferie.										
Données indirectes utilisées dans l'estimation ?	Données PID utilisées pour guider les échantillons à analyser en laboratoire, mais pas intégrées dans l'estimation géostatistique.										
Points spécifiques géostatistiques	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;">Méthodes</td> <td>Krigeage de bloc sur données brutes (HCT) Krigeage d'indicatrices pour</td> </tr> </table>	Méthodes	Krigeage de bloc sur données brutes (HCT) Krigeage d'indicatrices pour								
Méthodes	Krigeage de bloc sur données brutes (HCT) Krigeage d'indicatrices pour										

			calculer les probabilités de dépasser le seuil (de bloc)
		Y a t'il eu transformation / back-transformation des données en distribution gaussienne ?	Ne s'applique pas ici (krigeage sur données brutes)
		Dégroupement réalisé en cas de clusters ?	N/A
		Vérifier si un changement de support diag-dépol a été modélisé.	oui

Estimations des quantités et localisation de la pollution en dépollution

Méthode d'estimation utilisée	N/A														
Spécificités des données utilisées	<p>18 sondages (S1 à S18) pour le suivi du traitement in situ Analyses en fonds et parois de fouille après excavation Zones sources résiduelles excavées montrant un marquage significatif aux hydrocarbures à l'ouest de la zone</p> <table border="1"> <tr> <td>Nombre</td> <td colspan="2">N/A</td> </tr> <tr> <td>Types</td> <td colspan="2">Analyse au laboratoire des HCT</td> </tr> <tr> <td>Support</td> <td colspan="2">N/A</td> </tr> <tr> <td>Répartition dans l'espace</td> <td colspan="2"> <u>Irrégulière :</u> - Forages de suivi du traitement in situ : plutôt en bordure de zone. - Prélèvement pour contrôle après excavation : en fond et parois de fouille, pour contrôle de la pollution résiduelle. </td> </tr> </table>			Nombre	N/A		Types	Analyse au laboratoire des HCT		Support	N/A		Répartition dans l'espace	<u>Irrégulière :</u> - Forages de suivi du traitement in situ : plutôt en bordure de zone. - Prélèvement pour contrôle après excavation : en fond et parois de fouille, pour contrôle de la pollution résiduelle.	
Nombre	N/A														
Types	Analyse au laboratoire des HCT														
Support	N/A														
Répartition dans l'espace	<u>Irrégulière :</u> - Forages de suivi du traitement in situ : plutôt en bordure de zone. - Prélèvement pour contrôle après excavation : en fond et parois de fouille, pour contrôle de la pollution résiduelle.														

Comparaison des estimations de diagnostic et résultats de dépollution

Estimation globale (masses de polluants, volumes ou tonnages de terres par filière, etc...)	<u>Diagnostic :</u>				
	<p>Le volume de terres polluées présentant des concentrations supérieures à 500 mg/kg ms est évalué à environ 585 m³ sur une surface de 150 m² environ (valeur pessimiste présentée dans la modélisation géostatistique de 2010, après intégration des sondages complémentaires).</p>				
		Seuil à 500 ppm Volumes estimés 2009		Seuil à 500 ppm Volumes estimés mis à jour 2010	
	Probabilité de dépassement de seuil	Volume estimé (m ³)	Volume théorique pessimiste (m ³)	Volume estimé (m ³)	Volume théorique pessimiste (m ³)
	75%	303	947	240	585
	80%	215	806	170	415
	90%	146	664	110	290
	Remblais à priori propres de 0 à 1 m	-	-	25	55

	Seuil à 2000 ppm		Seuil à 2000 ppm		
	Volumes estimés 2009		Volumes estimés mis à jour 2010		
	Probabilité de dépassement de seuil	Volume estimé (m ³)	Volume théorique pessimiste (m ³)	Volume théorique pessimiste (m ³)	
	75%	250	800	115	315
	80%	200	700	65	205
	90%	100	600	25	135
	Remblais à priori propres de 0 à 1 m	-	-	10	30
	<p>Volume théorique pessimiste : borne haute de l'intervalle de confiance sur l'estimation du volume (valeur + erreur de krigeage)</p> <p><u>Dépollution :</u> Le traitement in situ a été peu efficace. Au final, 600 tonnes de terres polluées ont été excavées (voir image ci-dessous). Dans l'hypothèse où la densité des remblais est de 1.8, le volume pollué excavé serait donc de 333 m³, ce qui constitue une erreur relative de 76% par rapport au volume estimé lors du diagnostic.</p>				
Estimation locale (localisation des zones les plus polluées)	Pas de contrôle en dehors de la zone source.				
Appréciation du donneur d'ordre sur ces résultats	<p>Le traitement est considéré comme peu efficace (pic de concentration en [HCT en S10] en fin de traitement > [HCT en AC05] max initial). Le terme source a ainsi été sous-estimé.</p> <p>Les préconisations de réalisation de nouveaux sondages étaient pertinentes. Les sondages préconisés ont permis de réduire l'incertitude.</p> <p>L'excavation a montré des impacts significatifs au droit de la bêche Nord (Z2F7, Z2F6), l'extension Nord-Ouest a pu être sous-estimée.</p> <p>Les volumes excavés semblent cohérents avec l'estimation initiale.</p>				
Appréciation du bureau d'étude/de la société de dépollution sur ces résultats	N/A				
Impacts des écarts éventuels	N/A				

Avis d'expert sur les raisons des écarts ou similitudes observés entre estimations de diagnostic et résultats de dépollution

Liste hiérarchisée des éléments pouvant expliquer les écarts ou la similitude des résultats	<p>L'erreur d'estimation, très forte (76% en surestimation), peut trouver son explication dans plusieurs facteurs :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Le cas ne présente pas de forte complexité : cas mono-activité et mono-polluant, seule la nature de la lithologie (remblais) est source d'hétérogénéité, - Les investigations de diagnostic ne remplissent que 2 des 5 facteurs identifiés comme éléments favorables à la réduction des écarts (densité de sondage de 1 pour 24 m², protocole d'échantillonnage homogène), - Si le recours à une approche géostatistique est tout à fait pertinent dans le cas présent, sa mise en œuvre pour l'estimation des volumes contaminés en place, n'est pas réalisée dans les règles de l'art. Elle consiste en effet à une sélection des mailles dépassant le seuil avec un niveau de probabilité donné (approche locale). L'approche à privilégier consiste au contraire à calculer un volume contaminé pour chaque simulation puis à faire l'analyse probabiliste de la distribution des
---	--

	<p>volumes obtenus pour l'ensemble des simulations (moyenne, quantiles...).</p> <ul style="list-style-type: none"> - Les comparaisons de m^3 et de T ne simplifient pas l'analyse.
Suggestion d'amélioration des estimations (diagnostic/dépollution)	<ul style="list-style-type: none"> - La répartition des sondages au sein de la zone d'intérêt aurait vraisemblablement pu être optimisée. - Respecter les règles de l'art relatives à la mise en œuvre des méthodes géostatistiques.

Autres illustrations

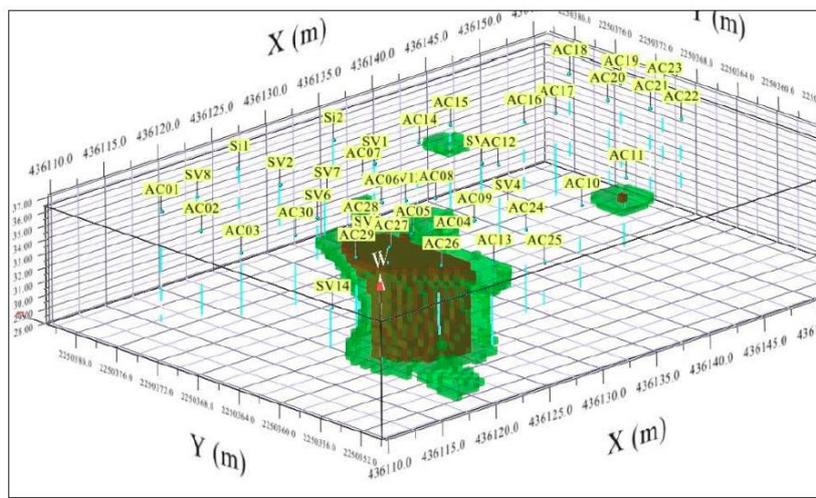


Figure 2 Bloc diagramme représentant le volume de sol pollué estimé en diagnostic, dont la probabilité de dépasser 500 mg/kg ms est de plus de 90%.

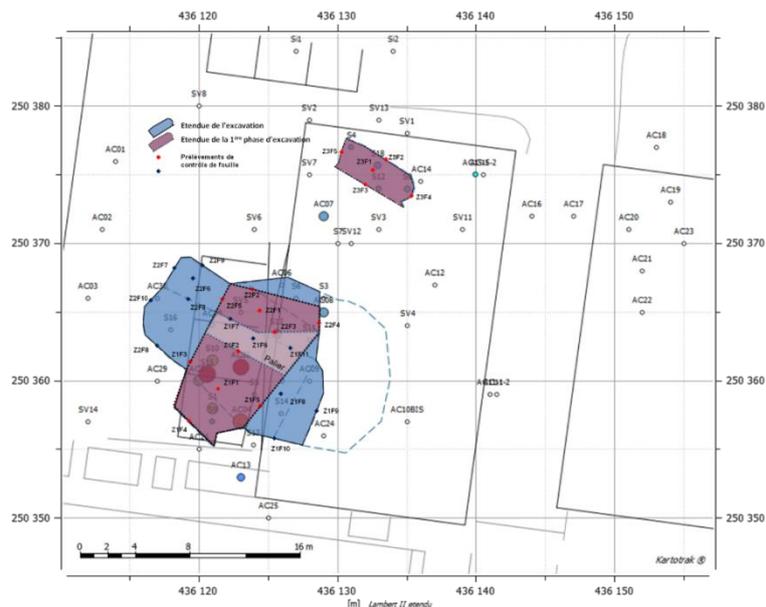


Figure 3 Schéma des zones excavées après traitement in situ.

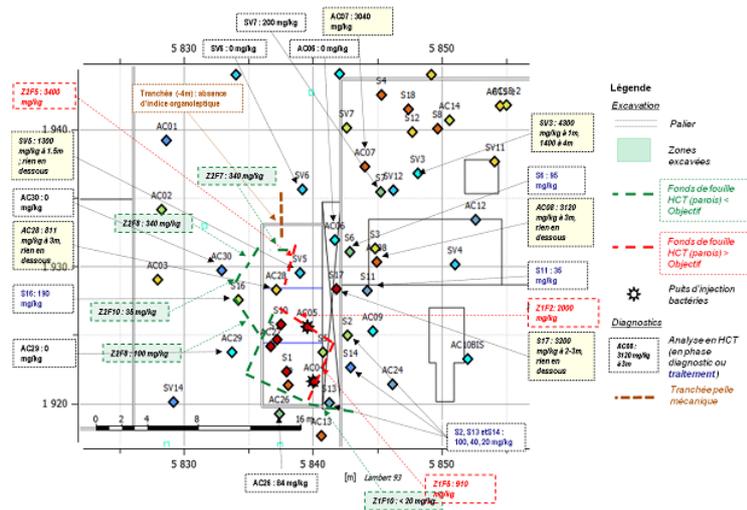


Figure 4 Résultats d'analyse du suivi du traitement biologique in situ (S1 à S18) et de contrôle des fonds et parois de fouille après excavation (ZxFy) sur fond de plan schématique de la zone source.

<i>Caractéristiques générales</i>	
Activité(s) à l'origine de la pollution	Confidentiel
Période(s) et durée(s) d'activité	Confidentiel
Surface du site (parcelle(s))	25000 m ²
Types de substances justifiant une dépollution	Hydrocarbures lourds, HAP (BAP), Hydrocarbures chlorés (TRI)
Gammes de concentrations par milieu atteint (sol, eau souterraine, eau surface, air intérieur, sédiments,...)	Sol : C10-C40 : 550 – 9630 mg/kg ms (pic à 26200 mg/kg ms), BTEX 38 – 105 mg/kg ms, HAP 52 – 8200 mg/kg ms), Hydrocarbures chlorés (COHV 0.08 – 1.18 mg/kg ms), Métaux, Déchets anthropiques (mâchefers, briques, céramiques,...), Amiante. Parmi les hydrocarbures : les fractions les plus lourdes sont majoritaires (90% à 100% des hydrocarbures sont des fractions C ₁₆₊ , majorité de C ₂₄₊).
Types de terrains atteints par la pollution	Remblais (1-1.5 m épaisseur), Argiles et limons sableux (1-1.5 m épaisseur), Sables fins (4-6 m épaisseur), Marnes grises à bleues
Caractéristiques de la (des) nappe(s) atteinte(s) par la pollution	Nappe de niveau variable selon l'emplacement sur le site (crépines entre 2 et 7 m, et entre 1.5 et 10.5 m suivant les secteurs).
Occupation du site et de ses environs	

<i>Etudes et travaux réalisés sur le site pollué</i>	
2009-2011	Investigation des sols en 3 phases, avant dépollution pyrotechnique (piézairs et piézomètres également)
2011	Dépollution pyrotechnique
Nov.2011-Janv. 2012	Investigation des sols, en cours et après dépollution pyrotechnique
Juin 2012	Investigation des sols (piézomètres également)
Nov.-Déc. 2012	Investigation des sols (piézairs et piézomètres également)
Févr. 2013	Investigations du sol des zones renfermant potentiellement de l'amiante
2013 - 2014	Diagnostic complémentaire réalisé par l'entreprise de dépollution avant démarrage des travaux Dépollution par excavation et tri des sols

<i>Caractéristiques de la dépollution</i>	
Type(s) de dépollution	Hors site et sur site après excavation des terres
Technique(s) de dépollution	Excavation et tri pour traitement : <ul style="list-style-type: none"> - Sur site par voie biologique (biopiles) - Hors site (mise en décharge, biocentre,...) Les terres traitées sur place peuvent être réutilisées sur place en remblais (suivant teneurs atteintes).

Description détaillée des objectifs fixés à la dépollution	Composés	Teneurs dans les sols (mg/kg ms)
	C ₆ -C ₁₀	50
	C ₁₀ -C ₄₀ (C ₁₀ -C ₁₆)	Espaces verts : 500 (50) Voirie : 500 (100)
	HAP (naphtalène, benzo(a)pyrène)	50 (1,5)
	BTEX (benzène)	6 (0.3)
	Tétrachloréthylène	0.5
	Trichloréthylène	0.5
	Cis-1,2-dichloréthylène	0.5
	Chlorure de vinyle	Espaces verts : < LQ Voirie : 0.5
	COHV (18)	2
	PCB (7)	1

<i>Estimations des quantités et localisation de la pollution en diagnostic</i>	
Type de méthode d'estimation utilisée	
Méthode précise d'estimation	
Dimension	
Spécificités des données utilisées	<p>1) Diagnostic avant dépollution pyrotechnique (2009-2011) : 270 sondages à la pelle mécanique, de 50 cm à 5 m de profondeur, dont :</p> <ul style="list-style-type: none"> - 10 entre 0.5 et 1 m de profondeur - 108 entre 3 et 5.5 m - 87 entre 3 et 5.5 m - 65 jusqu'à 5 m de profondeur. <p>2) Diagnostic après dépollution pyrotechnique (Nov. 2011-Janv.2012) : 57 sondages à la pelle mécanique, de 1 à 6 m de profondeur.</p> <p>3) Diagnostic complémentaire (Juin 2012) : 40 sondages à la pelle mécanique, de 1.2 à 2.2 m de profondeur.</p> <p>4) Diagnostic complémentaire (Nov./Déc. 2012) :</p> <ul style="list-style-type: none"> - 70 sondages à la pelle mécanique, de 3 à 4 m de profondeur. - 13 sondages à la tarière mécanique, de 8 m de profondeur. <p>5) Diagnostic complémentaire (Févr. 2013) : 22 sondages à la pelle mécanique de 2 m de profondeur, pour recherche d'amiante.</p> <p>En général 1 échantillon de sol par sondage, sauf dans les tarières mécaniques (3 éch. dans certains sondages)</p>
Nombre	360 échantillons de sol
Types	Analyses labo dans le sol : C10-C40,

		C5-C10, COHV, HAP, BTEX, PCB, Métaux, TPH (coupes pétrolières) Mesures in situ dans le sol durant la première phase d'investigation avant dépollution pyrotechnique : COV par tubes colorimétriques RAE et/ou PID dans certains sondages
	Support	Pas d'informations à ce sujet dans le rapport Selon tableaux fournis, épaisseur échantillonnée variable, de 0.1 m à 1.9 m.
	Répartition dans l'espace	Pas d'informations à ce sujet dans le rapport (aucune carte).
Densité des données utilisées		
Données indirectes utilisées dans l'estimation ?	Mesures sur site durant la première phase d'investigation avant dépollution pyrotechnique : COV par tubes colorimétriques RAE et/ou PID dans certains sondages Indices organoleptiques (odeur, couleur)	

Estimations des quantités et localisation de la pollution en dépollution

Méthode d'estimation utilisée	<p>Excavation de 35 zones</p> <p>Stockage temporaire sur une aire de tri, des sols excavés dans les zones, ainsi qu'en dehors des zones dans les secteurs présumés sains et devant être excavés.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Sols des secteurs présumés sains : prélèvements d'échantillons composites de 200 m³ à la pelle mécanique, analyse de tous les paramètres constituant les objectifs de réhabilitation. - Sols des zones présumées contaminées : prélèvements d'échantillons composites de 200 m³ à la tarière manuelle, analyse des HCT (et/ou COHV, HAP, BTEX, selon les indices organoleptiques). Le seuil de 500 HCT et/ou 50 HAP (1.5 BAP) et/ou 0.5 TRI (mg/kg ms), déterminent le choix de la filière d'élimination (réutilisation en remblais sur site, traitement biologique sur site HCT < 3000 mg/kg ms, évacuation hors site HCT > 3000 mg/kg ms). <p>Certains sols d'une zone contaminée (33) ont dû être criblés pour évacuer la partie la plus grossière (briques, céramiques,..) vers un centre agréé (690 tonnes).</p> <p>Contrôle de l'absence de pollution résiduelle en parois et fonds de fouilles.</p>							
Spécificités des données utilisées	<table border="1"> <tr> <td>Nombre</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Types</td> <td>Analyses de laboratoire des C10-C40, HAP, BTEX, COHV Indices organoleptiques</td> </tr> <tr> <td>Support</td> <td></td> </tr> </table>		Nombre		Types	Analyses de laboratoire des C10-C40, HAP, BTEX, COHV Indices organoleptiques	Support	
Nombre								
Types	Analyses de laboratoire des C10-C40, HAP, BTEX, COHV Indices organoleptiques							
Support								

	Répartition dans l'espace	<p>Irrégulière :</p> <p>Essentiellement dans- (contrôle après excavation, dans zone de stockage temporaire) et en pourtour des 35 zones polluées (dans les sols en place).</p> <p>Mais aussi dans les zones saines devant être excavées (après excavation dans zone de stockage temporaire).</p> <p>Pas de contrôle dans les zones présumées saines ne devant pas être excavées.</p>
--	---------------------------	--

Comparaison des estimations de diagnostic et résultats de dépollution

Estimation globale (masses de polluants, volumes ou tonnages de terres par filière, etc...)	<p>Diagnostic : 4 estimations de volumes, pour des hypothèses plus ou moins optimistes :</p> <p>Cas favorable : « vision réaliste de l'extension des zones à traiter dans des secteurs bien contraints par les sondages + vision optimiste dans les zones moins contraintes ».</p> <p>Cas moins favorable : « vision réaliste de l'extension des zones à traiter dans des secteurs bien contraints par les sondages + vision pessimiste dans les zones moins contraintes ».</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Volumes non foisonnés</th> <th>Cas favorable</th> <th>Cas moins favorable</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Contamination des sols par des hydrocarbures C₁₀-C₄₀</td> <td>26940</td> <td>46260</td> </tr> </tbody> </table> <p>Les cartes des zones ne sont pas dans le rapport. Dépollution : 19840 m³ de sols pollués traités.</p>	Volumes non foisonnés	Cas favorable	Cas moins favorable	Contamination des sols par des hydrocarbures C ₁₀ -C ₄₀	26940	46260
Volumes non foisonnés	Cas favorable	Cas moins favorable					
Contamination des sols par des hydrocarbures C ₁₀ -C ₄₀	26940	46260					
Estimation locale (localisation des zones les plus polluées)	<p>Contamination plus étendue que prévu dans une zone (12/18).</p> <p>Pollution résiduelle en place ?</p> <p>Pas d'infos sur les terres présumées saines, qui se sont révélées polluées, et vice-versa.</p>						
Appréciation du donneur d'ordre sur ces résultats	Très satisfait de la réhabilitation. A toutefois noté un écart entre les volumes de terres polluées estimés par le BE et les volumes réellement rencontrés et pris en charge sur le terrain.						
Appréciation du bureau d'étude/de la société de dépollution sur ces résultats							
Impacts des écarts éventuels							

Avis d'expert sur les raisons des écarts ou similitudes observés entre estimations de diagnostic et résultats de dépollution

<p>Liste hiérarchisée des éléments pouvant expliquer les écarts ou la similitude des résultats</p>	<p>L'erreur d'estimation, très forte (84% en surestimation), peut trouver son explication dans plusieurs facteurs :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Le cas est particulièrement complexe : plusieurs activités, plusieurs familles de polluants complexes, lithologie complexe, - Les investigations de diagnostic ne remplissent qu'une partie des facteurs identifiés comme éléments favorables à la réduction des écarts, certains éléments n'étant en outre pas connus (répartition spatiale des données), - L'estimation empirique a le mérite de présenter deux estimations de volumes qui sont fonction d'hypothèses plus ou moins favorables ; au final, ces estimations restent néanmoins toutes les deux supérieures au volume finalement dépollué. - La dépollution a été minutieuse, permettant probablement au final de trier plus finement les sols. - Les comparaisons de m³ et de T ne simplifient pas l'analyse.
<p>Suggestion d'amélioration des estimations (diagnostic/dépollution)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Malgré le peu d'informations disponibles, il semblerait que les conditions d'investigations soient perfectibles pour ce cas, tout comme la méthodologie d'estimation.

<i>Caractéristiques générales</i>	
Activité(s) à l'origine de la pollution – Période(s) d'activité	Deux bâtiments, à partir des années 1950 : <ul style="list-style-type: none"> • emploi de cyanures alcalins, traitement électrolytique, cuves d'huile, • citerne compartimentée de 6000 et 4000 litres d'huile à transformateur, cuve de 7000 litres de pyralène, 3 cuves de 200 litres d'huile.
Surface du site (parcelle(s))	Surface totale 14 781 m ²
Types de substances justifiant une dépollution	Chlorobenzènes, COHV, métaux lourds, présence de PCB Problématique nappe non adressée dans la fiche.
Gammes de concentrations par milieu atteint (sol, eau souterraine, eau surface, air intérieur, sédiments,...)	Valeurs max rencontrées dans les sols : Cu 120mg/kg MS, As 26mg/kg MS, PCB totaux 140mg/kg MS
Types de terrains atteints par la pollution	- Remblais jusqu'à 40-60 cm - Jusqu'à environ 2 m de profondeur : de sable fin argileux à propre - puis des niveaux marneux ou argileux beiges, souvent sableux à graveleux (graviers calcaires), et parfois plastiques
Caractéristiques de la (des) nappe (s) atteinte (s) par la pollution	Nappe libre. Niveau piézométrique d'environ 4 m sur le site
Occupation du site et de ses environs	Reconversion en logements et bureaux, avec niveaux de sous-sols jusqu' à 6.5 m de profondeur

<i>Etudes et travaux réalisés sur le site pollué</i>	
Janvier 2000	Pré-diagnostic environnemental.
Août 2000	Rapport préliminaire – Investigations des sols et de la nappe. <ul style="list-style-type: none"> - 4 sondages au carottier, à 3 m de profondeur - 7 piézomètres à 5 m de profondeur, en complément de 3 existants - 10 mesures PID
Juin 2001	Rapport final – Investigations des sols et de la nappe. <ul style="list-style-type: none"> - 10 points de mesures d'analyses des gaz du sol - 1 piézomètre supplémentaire et nouvelle campagne de prélèvement d'eau
Janvier 2004	Rapport final – Note de synthèse des investigations des sols et de la nappe. <ul style="list-style-type: none"> - Suivi de la nappe de décembre 2002 à juin 2003
Avril 2006	Étude documentaire – Diagnostic global de la pollution du sous-sol du quartier.
2006	Diagnostic environnemental approfondi du sous-sol et EDR. <ul style="list-style-type: none"> - 18 sondages jusqu'à 3 ou 6 m, prélèvement d'échantillons moyens par tranche de 1 m (63 échantillons) - 3 piézomètres, 3 échantillons prélevés - Quelques anomalies organoleptiques

<i>Caractéristiques de la dépollution</i>	
Type(s) de dépollution	La réalisation des parkings en sous-sol nécessite l'excavation des terres sur environ 6.50 mètres pour deux niveaux de sous-sol.
Technique(s) de dépollution	
Description détaillée des objectifs fixés à la dépollution	Envoi en centre de stockage de déchets inertes (classe 3) sur la base des valeurs fournies dans l'Arrêté ministériel du 15 mars 2006. Envoi en centre de stockage de classes 1 et 2 selon les conditions réglementaires générales d'admission fournies dans la décision du Conseil Européen du 19/12/2002 n°2003/33/CE.

<i>Estimations des quantités et localisation de la pollution en diagnostic</i>									
Type de méthode d'estimation utilisée	Déterministe : « Les limites latérales des mailles ne constituent pas les limites effectives des impacts. Elles ont été dessinées selon les règles de la dichotomie (à égale distance entre deux sondages). »								
Méthode précise d'estimation	Approche par plus proche voisin.								
Spécificités des données utilisées	Données Sols : <table border="1" data-bbox="544 887 1275 1095"> <tbody> <tr> <td>Nombre</td> <td>15 sondages jusqu'à 3 m, 3 jusqu'à 6 m</td> </tr> <tr> <td>Types</td> <td>Tarière</td> </tr> <tr> <td>Support</td> <td>Échantillons moyens par tranche de 1 m</td> </tr> <tr> <td>Répartition dans l'espace</td> <td>Sur base des anciens travaux, en fonction de l'accessibilité.</td> </tr> </tbody> </table>	Nombre	15 sondages jusqu'à 3 m, 3 jusqu'à 6 m	Types	Tarière	Support	Échantillons moyens par tranche de 1 m	Répartition dans l'espace	Sur base des anciens travaux, en fonction de l'accessibilité.
Nombre	15 sondages jusqu'à 3 m, 3 jusqu'à 6 m								
Types	Tarière								
Support	Échantillons moyens par tranche de 1 m								
Répartition dans l'espace	Sur base des anciens travaux, en fonction de l'accessibilité.								
Données indirectes utilisées dans l'estimation ?	Non								

<i>Estimations des quantités et localisation de la pollution en dépollution</i>	
Méthode d'estimation utilisée	
Spécificités des données utilisées	Partie Logements : <ul style="list-style-type: none"> • Suivi organoleptique • Terres régulièrement analysées au photo-ioniseur portatif pour les composés volatils Qualité de l'air : sonde PID en poste fixe et deux analyses d'air ambiant

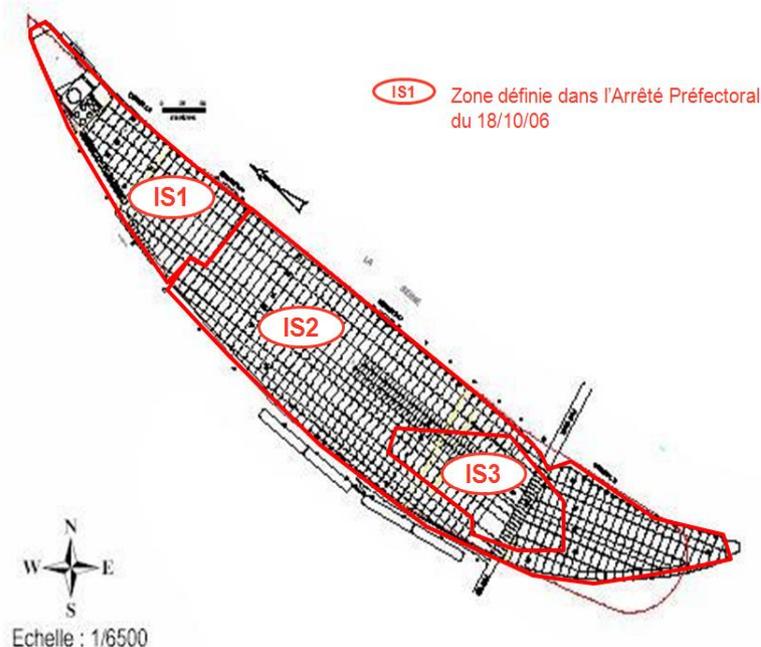
<i>Comparaison des estimations de diagnostic et résultats de dépollution</i>		
Estimation globale (masses de polluants, volumes ou tonnages de terres par filière, etc...)	Diagnostic	Dépollution
	69 000 m ³	73 000 m ³ foisonnés
Estimation locale (localisation des zones les plus polluées)	Adaptations réalisées par rapport au maillage initial. Tris effectués sur des mailles reconnues impactées afin d'optimiser les volumes évacués.	
Appréciation du donneur d'ordre sur ces résultats	Ecart considéré comme acceptable. Si le volume global pollué a été bien estimé, la découverte de maille polluées non prévues aurait pu perturber la répartition prévue entre CET et dépasser le budget alloué. Un tri fin des découvertes a été effectué pour minimiser au maximum les envois en CET1.	

	Le donneur d'ordre a eu peur mais était satisfait à la fin.
Appréciation du bureau d'étude/de la société de dépollution sur ces résultats	La couleur et texture des sols pollués du chantier fait qu'il est possible de trier les sols à l'avancement. Une maille rouge peut être subdivisée en 2 ou 3 sous-ensembles dont du propre.
Impacts des écarts éventuels	Pas d'impact du fait de la présence et de la réactivité du chef de projet qui a décidé de faire deux stocks tampon de sols douteux et de les trier.

Avis d'expert sur les raisons des écarts ou similitudes observés entre estimations de diagnostic et résultats de dépollution

Liste hiérarchisée des éléments pouvant expliquer les écarts ou la similitude des résultats	<p>L'erreur d'estimation est faible (5% en sous-estimation), en dépit d'une forte complexité. Pour autant, plusieurs facteurs sont perfectibles :</p> <ul style="list-style-type: none"> - La densité des investigations est très faible (1 sondage tous les 985 m² en moyenne) et conduit à des zones lacunaires ; en outre, le nombre de données utilisées au final semble faible au regard des nombreuses campagnes disponibles, - L'estimation a été réalisée par jugement d'expert complété par une interpolation par plus proche voisin.
Suggestion d'amélioration des estimations (diagnostic/dépollution)	<ul style="list-style-type: none"> - Privilégier un maillage régulier pour les investigations, - Une estimation géostatistique des volumes aurait gagné à être envisagée sur ce cas.

Site M – Ancienne usine de fabrication automobile – HC, HAP, COHV, BTEX, Métaux - Excavation



<i>Caractéristiques générales</i>	
Activité(s) à l'origine de la pollution – Période(s) d'activité	Fabrication automobile
Surface du site (parcelle(s))	115000 m2
Types de substances justifiant une dépollution	Les polluants mis en évidence dans les sols, les bétons et les remblais : hydrocarbures, COV, HAP, métaux. Les eaux souterraines ont été polluées par des COV, des COHV et des hydrocarbures (non adressé dans la fiche).
Gammes de concentrations par milieu atteint (sol, eau souterraine, eau surface, air intérieur, sédiments,...)	Anomalies en HCT, COV, COHV, HAP, Métaux (Arsenic, Nickel, Plomb, Chrome total). HCT : 5-15000 mg/kg
Types de terrains atteints par la pollution	Remblais, alluvions, craie
Caractéristiques de la (des) nappe (s) atteinte (s) par la pollution	A 8 m en relation avec la Seine
Occupation du site et de ses environs	Urbain sensible. Le site a été réhabilité; il est en grande partie réaménagé.

<i>Etudes et travaux réalisés sur le site pollué</i>	
1996 - 2008	<p>Plusieurs phases d'investigation :</p> <p>A varié dans le temps mais la grande majorité des échantillonnages est régulière :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Echantillonnage systématique selon une maille carrée de 15 m. - Prélèvements d'échantillons à la profondeur 0-2 m, 2-4 m, 4-6 m, 6-8 m, 8-10 m et 10-12 m - Les échantillons de sols sont prélevés sur une hauteur de 2 m. - Outils de prélèvement : tarière pleine à partir de 2 m de profondeur, carottage pour une profondeur comprise entre 0 et 2 m au niveau des bétons pollués.

2002 - 2009	14 chantiers de dépollution
-------------	-----------------------------

<i>Caractéristiques de la dépollution</i>																																																	
Type(s) de dépollution	<p>14 chantiers de dépollution conduits entre 2002 et 2009 :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Excavation + Traitement in situ - Excavation + élimination en filières agréées <p>Au total :</p> <p>423 000 tonnes de terres excavées 220 000 tonnes de terres traitées sur site 158 000 tonnes de terres éliminées Coût des travaux : de l'ordre de 60 Millions d'€uros</p>																																																
Technique(s) de dépollution	<p>Les excavations ont été réalisées par tranche de 2 mètres selon des plans de terrassement définis au préalable, et ce jusqu'à une profondeur pouvant atteindre 12 m. Le principe du traitement mis en œuvre est le terrassement des terres contaminées, leur mise en traitement sur des andains biologiques et leur réutilisation en remblais, une fois les seuils atteints.</p> <p>Les sols à des teneurs trop importantes ou les plus pollués ont été évacués du site.</p>																																																
Description détaillée des objectifs fixés à la dépollution	<table border="1"> <thead> <tr> <th>SUBSTANCES</th> <th>Objectifs de réhabilitation sur matériaux bruts (en mg/kg de matières sèches)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Hydrocarbures totaux</td> <td>4 000</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Composés aromatiques volatils</td> </tr> <tr> <td>Benzène</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>Toluène</td> <td>27</td> </tr> <tr> <td>Ethylbenzène</td> <td>164</td> </tr> <tr> <td>Xylène total</td> <td>70</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Composés organo-halogénés volatils</td> </tr> <tr> <td>1,1 Dichloréthane</td> <td>25</td> </tr> <tr> <td>Trichloroéthylène (TCE)</td> <td>6</td> </tr> <tr> <td>Tétrachloroéthylène</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>1,2 Trans-dichloroéthylène -</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>1,2 Cis- dichloroéthylène</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>Dichlorométhane</td> <td>48</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Hydrocarbures aromatiques polycycliques</td> </tr> <tr> <td>Naphtalène</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>Benzo(a)pyrène</td> <td>157</td> </tr> <tr> <td>Somme des HAP (hors naphtalène)</td> <td>500</td> </tr> <tr> <th>SUBSTANCES</th> <th>Objectifs de réhabilitation mg/kg sur fraction lixiviable</th> </tr> <tr> <td colspan="2">Métaux</td> </tr> <tr> <td>Arsenic</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>Nickel</td> <td>20</td> </tr> <tr> <td>Plomb</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>Chrome total</td> <td>15</td> </tr> </tbody> </table>	SUBSTANCES	Objectifs de réhabilitation sur matériaux bruts (en mg/kg de matières sèches)	Hydrocarbures totaux	4 000	Composés aromatiques volatils		Benzène	1	Toluène	27	Ethylbenzène	164	Xylène total	70	Composés organo-halogénés volatils		1,1 Dichloréthane	25	Trichloroéthylène (TCE)	6	Tétrachloroéthylène	3	1,2 Trans-dichloroéthylène -	2	1,2 Cis- dichloroéthylène	4	Dichlorométhane	48	Hydrocarbures aromatiques polycycliques		Naphtalène	5	Benzo(a)pyrène	157	Somme des HAP (hors naphtalène)	500	SUBSTANCES	Objectifs de réhabilitation mg/kg sur fraction lixiviable	Métaux		Arsenic	2	Nickel	20	Plomb	10	Chrome total	15
SUBSTANCES	Objectifs de réhabilitation sur matériaux bruts (en mg/kg de matières sèches)																																																
Hydrocarbures totaux	4 000																																																
Composés aromatiques volatils																																																	
Benzène	1																																																
Toluène	27																																																
Ethylbenzène	164																																																
Xylène total	70																																																
Composés organo-halogénés volatils																																																	
1,1 Dichloréthane	25																																																
Trichloroéthylène (TCE)	6																																																
Tétrachloroéthylène	3																																																
1,2 Trans-dichloroéthylène -	2																																																
1,2 Cis- dichloroéthylène	4																																																
Dichlorométhane	48																																																
Hydrocarbures aromatiques polycycliques																																																	
Naphtalène	5																																																
Benzo(a)pyrène	157																																																
Somme des HAP (hors naphtalène)	500																																																
SUBSTANCES	Objectifs de réhabilitation mg/kg sur fraction lixiviable																																																
Métaux																																																	
Arsenic	2																																																
Nickel	20																																																
Plomb	10																																																
Chrome total	15																																																

<i>Estimations des quantités et localisation de la pollution en diagnostic - GEOSTAT</i>	
Type de méthode d'estimation utilisée	<p>Test d'application de la géostatistique sur une zone particulière.</p> <p>Les recollements n'ont pas été jugés satisfaisants et les autres zones ont été réalisées par définition des polygones de Voronoi (plus proche voisin) et multiplication par épaisseur. Revue par expert.</p>
Méthode précise d'estimation	<p>Estimations des teneurs par krigeage ont été réalisées après l'analyse exploratoire et variographique des données des polluants. HCT, HAP, COHV.</p> <p>Estimation des volumes pollués par des simulations conditionnelles, Seuils appliqués :</p> <p>HCT > 1000 ppm COHV + BTEX > 20 ppm</p> <p>Application du seuil de dépollution sur les valeurs de référence de bloc 5m x 5 m et 20</p>

	<p>m x 20 m</p> <p>Application des méthodes sur 2 zones : tout le site ou une zone centrale</p> <p>Influence du seuil de dépollution : Choix d'un seuil de dépollution de 100 ppm en HCT : plus grande distribution d'échantillons</p> <p>Influence de la structuration spatiale des données</p> <p>Influence du nombre de données</p> <p>Effet d'information : comparaison estimateur de bloc (modélisation de la dépollution réelle) et référence de bloc (valeurs vraies des teneurs de maille)</p>								
Spécificités des données utilisées	<table border="1"> <tr> <td>Nombre</td> <td>Pour Géostatistique, au sein de la zone testée : 300 sondages / 1751 analyses</td> </tr> <tr> <td>Types</td> <td>1751 mesures HC 1576 mesures COHV, BTEX 522 mesures HAP</td> </tr> <tr> <td>Support</td> <td>homogène : prélèvements tous les 2 m de 0 à 12 m, à la tarière.</td> </tr> <tr> <td>Répartition dans l'espace</td> <td>Maille carrée 15 x 15 m</td> </tr> </table>	Nombre	Pour Géostatistique, au sein de la zone testée : 300 sondages / 1751 analyses	Types	1751 mesures HC 1576 mesures COHV, BTEX 522 mesures HAP	Support	homogène : prélèvements tous les 2 m de 0 à 12 m, à la tarière.	Répartition dans l'espace	Maille carrée 15 x 15 m
Nombre	Pour Géostatistique, au sein de la zone testée : 300 sondages / 1751 analyses								
Types	1751 mesures HC 1576 mesures COHV, BTEX 522 mesures HAP								
Support	homogène : prélèvements tous les 2 m de 0 à 12 m, à la tarière.								
Répartition dans l'espace	Maille carrée 15 x 15 m								
Données indirectes utilisées dans l'estimation ?	Non								
Points à vérifier (info. Interne à Geovariances-eOde9)	<p>Transformation gaussienne.</p> <p>Application du seuil de dépollution à chaque simulation conditionnelle ponctuelle : HCT > 1000 mg/kg ms</p> <p>Application du seuil de dépollution à chaque simulation conditionnelle de bloc</p> <p>Etude de sensibilité</p>								

Estimations des quantités et localisation de la pollution en dépollution	
Méthode d'estimation utilisée	
Spécificités des données utilisées	<p>Ajustement de variogrammes expérimentaux par couche de 2 m et par zone de l'île. Le meilleur traceur est HCT :</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>Couche 2 - 4 m</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>Zone A</p> </div> </div> <ul style="list-style-type: none"> • Effet de pépité de 0,05 • Schéma exponentiel de portée 60 m et de palier 0.37 • Bonne structuration spatiale par couche de 2 m : <ul style="list-style-type: none"> ↳ Portée de 50 à 70 m, ↳ Effet de pépité de 0,05 à 0,3, ↳ Palier de 0,3 à 0,5 • Mauvaise structuration spatiale par zone et par couche : <ul style="list-style-type: none"> ↳ Effet de dérive, ↳ Effet de pépité pur,

	↪ Ajustement délicat pour une distance inférieure à 100 m
--	---

<i>Comparaison des estimations de diagnostic et résultats de dépollution</i>		
Estimation globale (masses de polluants, volumes ou tonnages de terres par filière, etc...)	<u>Estimation des volumes au sein de la zone centrale :</u>	
	Diagnostic	Dépollution
	10 000 m ³ IC 90% : [7500 - 12500 m ³] IC 95% : [5000 - 15 000 m ³]	13 555 m ³ (21 689 t avec densité 1.6 t/m ³)

Estimation locale (localisation des zones les plus polluées)	Non renseigné.
Appréciation du donneur d'ordre sur ces résultats	<p>Évaluation non réaliste du volume finalement dépollué car elle ne prend pas en compte les conditions de classification des sols et de gestion du chantier de dépollution.</p> <p>Lorsque la pollution de la zone polluée locale forme déjà des boules multiples de la maille de dépollution 25 m x 25 m, l'estimation géostatistique est très précise mais à quoi bon puisqu'une addition du volume des mailles carrées donne le même résultat.</p>
Appréciation du bureau d'étude/de la société de dépollution sur ces résultats	<p>Commentaire de 2005 : Sur la base de simulations conditionnelles, des traitements statistiques ont été réalisés afin que le modèle numérique reproduise au mieux la méthodologie pratique de dépollution. Les calculs mettent en évidence que le volume pollué estimé varie assez fortement en fonction du traitement statistique réalisé notamment taille et orientation des mailles (rapport de 1 à 2). Cette forte dispersion est en partie liée au travail sur la « queue » de la distribution (3% de valeurs dépassant le seuil). Des études complémentaires sont nécessaires pour mieux cerner la méthodologie à retenir.</p> <p>On retiendra de cette étude que l'intérêt principal des méthodes statistiques et probabilistes, dont la géostatistique n'est qu'une branche particulière développée pour les variables régionalisées, est de pouvoir quantifier l'incertitude associée à une prédiction, par un processus mathématique.</p> <p>Enfin, il faut être conscient que la géostatistique ne s'applique qu'à des variables structurées dans l'espace, structuration qui est mise en évidence par le variogramme expérimental.</p> <p>Celui-ci ne peut être représentatif que si l'on dispose d'un nombre de données relativement important. De facto, et sur la base des connaissances actuelles, seuls les grands sites pollués apparaissent potentiellement concernés par cette approche méthodologique.</p> <p>Des développements complémentaires sont encore nécessaires pour mieux cerner les bonnes pratiques de la géostatistique appliquée aux sites pollués.</p>
Impacts des écarts éventuels	Si l'étude géostatistique avait été utilisée comme telle sur l'ensemble du site, on aurait une surestimation du tonnage pollué global (200%). La zone la plus polluée est par contre bien mieux modélisée.

Avis d'expert sur les raisons des écarts ou similitudes observés entre estimations de diagnostic et résultats de dépollution

<p>Liste hiérarchisée des éléments pouvant expliquer les écarts ou la similitude des résultats</p>	<p>L'erreur d'estimation est significative (26% en sous-estimation), bien que le volume dépollué soit bien contenu dans l'intervalle de confiance à 95% estimé suite au diagnostic. Il faut souligner la forte hétérogénéité spatiale des teneurs dans la zone A (fort effet de pépité).</p> <p>La situation de pollution est moyennement complexe et les conditions d'investigation très bonnes sauf pour la densité de sondages, qui n'est que d'un sondage tous les 383 m².</p> <p>S'agissant de l'étude géostatistique mise en œuvre, on ne sait pas si le changement de support a été pris en compte.</p>
<p>Suggestion d'amélioration des estimations (diagnostic/dépollution)</p>	

<i>Caractéristiques générales</i>	
Activité(s) à l'origine de la pollution – Période(s) d'activité	Ancien négoce hydrocarbures, charbons, fabrique eau de javel, scierie, ferrailleurs
Surface du site (parcelle(s))	15600 m ²
Types de substances justifiant une dépollution	Métaux et hydrocarbures
Gammes de concentrations par milieu atteint (sol, eau souterraine, eau surface, air intérieur, sédiments,...)	As : 19-300 mg/kg, Cd : 1-42 mg/kg, Cr 6-1000 mg/kg, Cu 5-5000 mg/kg, Hg : 0.1-60 mg/kg, Pb 13-8000 mg/kg ; HCT 21-47000 mg/kg
Types de terrains atteints par la pollution	Remblais, d'une épaisseur moyenne de 3 m Terrains naturels (alluvions et craies) généralement exempts de pollution (métaux détectés très localement dans le toit des alluvions)
Caractéristiques de la (des) nappe (s) atteinte (s) par la pollution	Aucun impact significatif
Occupation du site et de ses environs	Urbain-très sensible

<i>Etudes et travaux réalisés sur le site pollué</i>	
2004	Etude historique
2004	Investigation sols
2005	Diagnostic approfondi

<i>Caractéristiques de la dépollution</i>	
Type(s) de dépollution	Excavation des zones impactées et de l'ensemble des remblais.
Technique(s) de dépollution	Tri élimination vers filières ad hoc lors des opérations de gros œuvre et parois moulées
Description détaillée des objectifs fixés à la dépollution	VDSS/VCI et critères d'acceptation en CET1/2/3

<i>Estimations des quantités et localisation de la pollution en diagnostic</i>	
Type de méthode d'estimation utilisée	Cartographie exhaustive du site en utilisant une méthode interne du BE : approche « base case / worst case »
Méthode précise d'estimation	Méthode considérée comme parmi les plus précises en raison de la densité de sondages. Maillage 10 x 10 m x 1 m avec analyse des remblais du site. Filière désigné selon concentration échantillon → Plan de base (Base case). Le « Worst case » est déterminé en supposant une mauvaise classification systématique de mailles en plus polluées → Plan défavorable (worst case).
Spécificités des données utilisées	3 campagnes d'échantillonnage : <ol style="list-style-type: none"> 28 sondages (maille 20x20 m) de 6 à 14 m de profondeur + 4 piézomètres (9 m de profondeur) À l'intérieur des anciens bâtiments (7 de 14 m) + sondages supplémentaires (10 de 14 m) Sondages plus denses avant travaux de dépollution (maille

	10x10 m, 120 sondages de 5 m de profondeur)	
	Nombre	143 échantillons pour 1 et 2, maille lâche, évaluation générale et profonde 720 pour 3, maille serrée, focalisée remblais.
	Types	Carottier HSA pour 1 et 2, carottier gauge pour 3
	Support	1 et 2 : sondage à support orienté géologique ie épaisseur non constante d'échantillons. 3 éch. en moyenne par sondages. 3 : 120 sondages, 720 échantillons. Composites métriques.
	Répartition dans l'espace	Homogène
	<p>Volumes à excaver pour futur parking : 79 200 m³ / 143 700 t</p> <ul style="list-style-type: none"> - Béton : 2 640 m³ / 5 800 t - Mailles < VDSS : 59 640 m³ / 107 400 t - Mailles ≥ VDSS : 10 380 m³ / 18 700 t - Mailles ≥ VCI : 6 540 m³ / 11 800 t <p>Incertitude des volumes présentés estimée à 40 %, correspondant à l'écart entre le scénario probable (base case) et le pire (worst case).</p>	
Données indirectes utilisées dans l'estimation ?	Oui : logs géologiques = base des remblais à excaver et PID.	

Estimations des quantités et localisation de la pollution en dépollution

Méthode d'estimation utilisée	Contrôles fond de fouille
Spécificités des données utilisées	<p>Scénario d'excavation complexe avec des parois moulées, des parois projetées, des zones d'extension. En bref c'est dépollué au fil de la construction du nouveau bâtiment.</p> <p>Scénario de dépollution :</p> <ul style="list-style-type: none"> • excavation des sols jusqu'à la cote 21,25 m sur la partie parkings • excavation des remblais en place jusqu'à la cote 28 m NGF en dehors de la zone parkings (certaines mailles jusqu'à la cote 27 m en fonction des observations) <p>Fond de fouille, 1 échantillon par maille 20x20 m à partir de 5 prélèvements ponctuels (tarière à main) pour les métaux et d'un prélèvement au centre pour les composés organiques</p>

Comparaison des estimations de diagnostic et résultats de dépollution

Estimation globale (masses de polluants, volumes ou tonnages de terres par filière, etc...)	Les volumes totaux diagnostiqués et dépollués sont repris ci-dessous.	
	Diagnostic (m ³)	Dépollution
	101 324 m³	80 370 m³
Estimation locale (localisation des zones les plus polluées)	Non renseigné.	
Appréciation du donneur d'ordre sur ces résultats	<p>Donneur d'ordre satisfait. Estimation sécuritaire ne s'éloignant que de 20 % de la réalité.</p> <p>Le BE en charge du projet devient un partenaire privilégié pour ce type d'opération.</p>	

Appréciation du bureau d'étude/de la société de dépollution sur ces résultats	Sans commentaire particulier. Cas standard pour les pollutions de remblais sur ce type de site sensible.
Impacts des écarts éventuels	Sans impact.

Avis d'expert sur les raisons des écarts ou similitudes observés entre estimations de diagnostic et résultats de dépollution

Liste hiérarchisée des éléments pouvant expliquer les écarts ou la similitude des résultats	<p>L'erreur d'estimation est significative (26% en surestimation) pour ce cas, relativement complexe mais bien investigué.</p> <p>L'estimation de diagnostic a été réalisée par une méthode empirique. En effet, pour ce type de remblais, le bureau d'étude privilégie une approche « minière » à forage systématique 10x10x1 sans interpolation mais avec des analyses de camions. Cette pratique pose néanmoins la question de la représentativité d'un échantillon ponctuel réalisé par maille dans des matériaux relativement hétérogènes !</p> <p>La caractérisation a été menée sur des échantillons d'1 m d'épaisseur, alors que l'épaisseur des mailles en dépollution était plutôt de l'ordre de 50 cm de façon à mieux cibler les niveaux contaminés. Il découle de cette approche un meilleur tri.</p>
Suggestion d'amélioration des estimations (diagnostic/dépollution)	Des investigations plus fines sur la verticale, combinées à une approche géostatistique, aurait pu permettre de préciser l'intérêt d'un tri fin des terres en amont des travaux.

Site 0 – Ancienne station-service – Hydrocarbures – Excavation + Biotertre

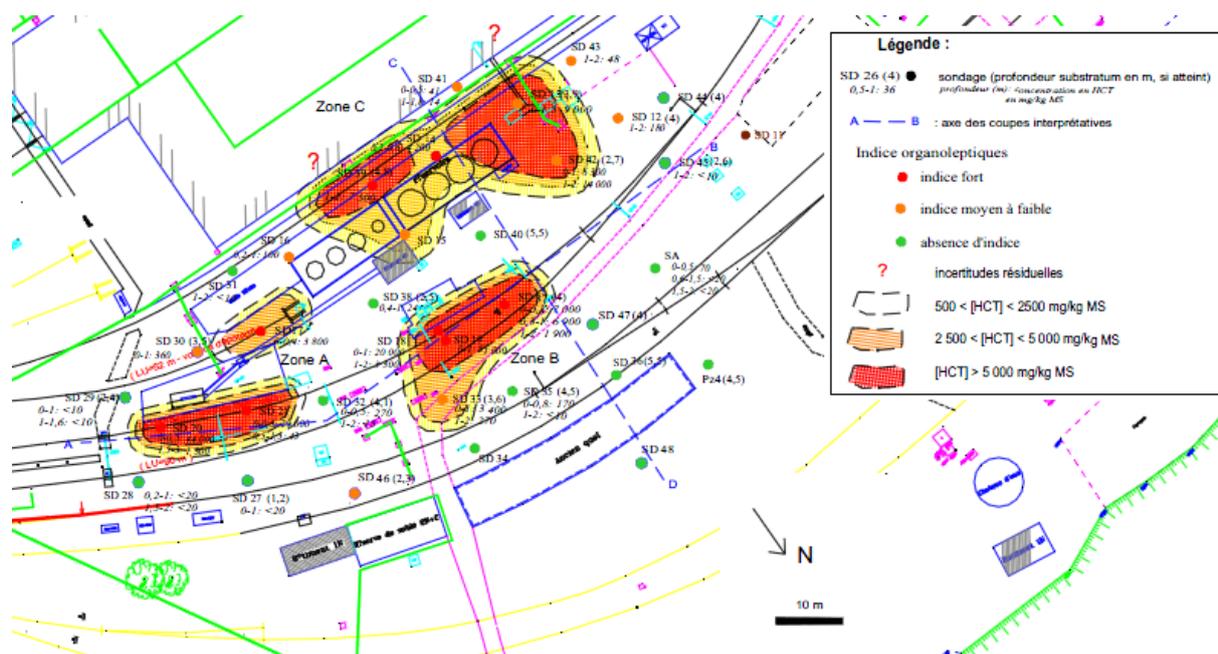


Figure 1 : Implantation des sondages, indices organoleptiques et qualité des sols entre 0 et 1m.

Caractéristiques générales	
Activité(s) à l'origine de la pollution	Station de distribution de carburant
Période(s) et durée(s) d'activité	Site en activité, évaluation de la qualité des sols dans le cadre de travaux de modernisation de la station.
Surface du site (parcelle(s))	~2 500 m ²
Types de substances justifiant une dépollution	Hydrocarbures.
Gammes de concentrations par milieu atteint (sol, eau souterraine, eau surface, air intérieur, sédiments,...)	Les valeurs maximales relevées dans les sols atteignent, au droit des zones impactées : <ul style="list-style-type: none"> ● HCT : 44 000 mg/kg_{MS}
Types de terrains atteints par la pollution	<ul style="list-style-type: none"> ● 0-2.2 m : remblais ● 2.2-3.3 m : argile compacte (alluvions) ● 3.3-5.6 m : graviers argileux ● >5.6 m : argile granuleuse, puis friable et plus grasse
Caractéristiques de la (des) nappe (s) atteinte (s) par la pollution	Nappe alluviale attendue entre 5 et 9 m mais non rencontrée au droit de la station au cours des investigations (jusqu'à 7.5 m de profondeur). Contamination exclue et hors du périmètre de la fiche.
Occupation du site et de ses environs	Site encore en activité, présence d'installations.

Etudes et travaux réalisés sur le site pollué	
2003	Diagnostic initial : 26 sondages de sols, identification de zones impactées mais sans délimitation.
2007	Diagnostic complémentaire non ciblé sur la station-service

2008	Diagnostic complémentaire : 30 sondages entre 4 et 7.5 m de profondeur.
2014	Dépollution

<i>Caractéristiques de la dépollution</i>	
Type(s) de dépollution	Excavation et traitement sur site.
Technique(s) de dépollution	Biotertre (24 mois).
Description détaillée des objectifs fixés à la dépollution	Seuils de dépollution à atteindre en HCT (C10-C40) : <ul style="list-style-type: none"> En cours de dépollution, lors des excavations : 2500 mg/kg en flancs et fond de fouille, sous réserve de faisabilité technique et des contraintes d'exploitation du site en activité, 500 mg/kg après 24 mois de traitement en biotertre.

<i>Estimations des quantités et localisation de la pollution en diagnostic</i>									
Type de méthode d'estimation utilisée	Jugement d'expert								
Méthode précise d'estimation	Jugement sur base de l'historique, des indices organoleptiques relevés et des résultats analytiques obtenus lors des investigations.								
Spécificités des données utilisées	<table border="1"> <tr> <td>Nombre</td> <td>30 sondages, 149 échantillons de sols prélevés (1 à 7 par sondage), 65 échantillons analysés.</td> </tr> <tr> <td>Types</td> <td>Indices organoleptiques, analyses HCT.</td> </tr> <tr> <td>Support</td> <td>Tarière de 80 mm. Echantillons moyens métriques en cas d'absence d'indice de pollution, prélèvements de sol ciblés dans le cas contraire en évitant de mélanger différentes lithologies.</td> </tr> <tr> <td>Répartition dans l'espace</td> <td>Maillage régulier 15m x 15m</td> </tr> </table>	Nombre	30 sondages, 149 échantillons de sols prélevés (1 à 7 par sondage), 65 échantillons analysés.	Types	Indices organoleptiques, analyses HCT.	Support	Tarière de 80 mm. Echantillons moyens métriques en cas d'absence d'indice de pollution, prélèvements de sol ciblés dans le cas contraire en évitant de mélanger différentes lithologies.	Répartition dans l'espace	Maillage régulier 15m x 15m
	Nombre	30 sondages, 149 échantillons de sols prélevés (1 à 7 par sondage), 65 échantillons analysés.							
	Types	Indices organoleptiques, analyses HCT.							
	Support	Tarière de 80 mm. Echantillons moyens métriques en cas d'absence d'indice de pollution, prélèvements de sol ciblés dans le cas contraire en évitant de mélanger différentes lithologies.							
Répartition dans l'espace	Maillage régulier 15m x 15m								
Densité des données utilisées	Densité moyenne de 1 sondage par 100 à 200 m ² dans les zones suspectes.								
Données indirectes utilisées dans l'estimation ?	De manière qualitative : historique et indices organoleptiques.								

<i>Estimations des quantités et localisation de la pollution en dépollution</i>	
Méthode d'estimation utilisée	Terrassements
Spécificités des données utilisées	Constats de l'état des flancs et fonds de fouilles sur la base d'observations organoleptiques, de mesures PID et de prélèvements d'échantillons de sols. 54 échantillons composites constitués à partir de plusieurs échantillons ponctuels et représentatifs d'une hauteur maximale de fouille de 3 m et d'une longueur maximale de 10 à 15 m linéaires.

<i>Comparaison des estimations de diagnostic et résultats de dépollution</i>	
Estimation globale (masses de polluants, volumes ou tonnages de	Comparaison réalisée sur base de la dépollution de trois zones impactées (A-B-C).

terres par filière, etc...)	Diagnostic	Dépollution
	<p>Volume de terres à traiter : 4 385 m³</p> <p>Objectif fixé par le donneur d'ordre (contraintes d'exploitation et techniques) : 3 000 m³</p>	<p>Volume de terres traitées : 3 743 m³</p>
<p>Après concertation avec le donneur d'ordre, 700 m³ de terres ont été traitées en plus sur base d'analyses sur les flancs et en fond de fouille non compatibles avec l'objectif de réhabilitation.</p> <p>Le diagnostic a donc conduit à une surestimation d'au plus 17% du volume de terres à traiter. Néanmoins, une pollution résiduelle a été laissée en place à proximité de certaines fouilles en raison des contraintes techniques liées au site mais aussi liées à la migration de la pollution en profondeur jusqu'au substratum plus imperméable, rendant l'excavation des terres impactées en fond de fouille difficilement réalisable techniquement vu leur profondeur (vers 6 m de profondeur).</p> <p>Par conséquent, diagnostic et dépollution présentent vraisemblablement une meilleure cohérence globale.</p>		
Estimation locale (localisation des zones les plus polluées)	<p>Il semble exister une bonne concordance entre les zones identifiées comme étant impactées lors du diagnostic de 2008 et les zones traitées en dépollution. On note néanmoins sur la figure ci-dessous quelques incohérences locales entre la délimitation des zones potentiellement impactées et les contours des fouilles ; ces incohérences sont partiellement dues aux contraintes d'exploitation du site.</p>	
Appréciation du donneur d'ordre sur ces résultats	<p>Incohérence entre les conditions de prélèvement en phase diagnostic et lors des contrôles en flanc/fond de fouille (échantillons beaucoup plus ponctuels).</p> <p>L'entreprise de travaux a commencé par la partie la moins polluée. Le suivi du donneur d'ordre n'a pas été suffisamment vigilant.</p>	
Appréciation du bureau d'étude/de la société de dépollution sur ces résultats	N/A	
Impacts des écarts éventuels	N/A	

Avis d'expert sur les raisons des écarts ou similitudes observés entre estimations de diagnostic et résultats de dépollution

Liste hiérarchisée des éléments pouvant expliquer les écarts ou la similitude des résultats	<p>L'erreur d'estimation est relativement acceptable (17% en surestimation) pour ce cas, relativement peu complexe mais pour lequel les conditions d'investigations sont perfectibles : existence de zones lacunaires / sous-échantillonnées, protocole de prélèvement variable entre les campagnes.</p> <p>L'estimation de diagnostic a été réalisée par une méthode empirique.</p> <p>Il faut saluer l'utilisation qualitative des indices organoleptiques afin de délimiter l'extension des zones impactées.</p> <p>Les écarts entre diagnostic et dépollution sont notamment liés à l'intégration de contraintes techniques lors de la dépollution, limitant localement cette dernière. On peut également noter des problèmes de contrôle en flancs/fond de fouille, retirant une partie de la fiabilité du calcul de volume dépollué, a</p>
---	--

	fortiori en raison de l'existence d'une pollution résiduelle.
Suggestion d'amélioration des estimations (diagnostic/dépollution)	Affiner la stratégie d'investigation et tester la valeur ajoutée d'une méthode géostatistique.

Autres illustrations

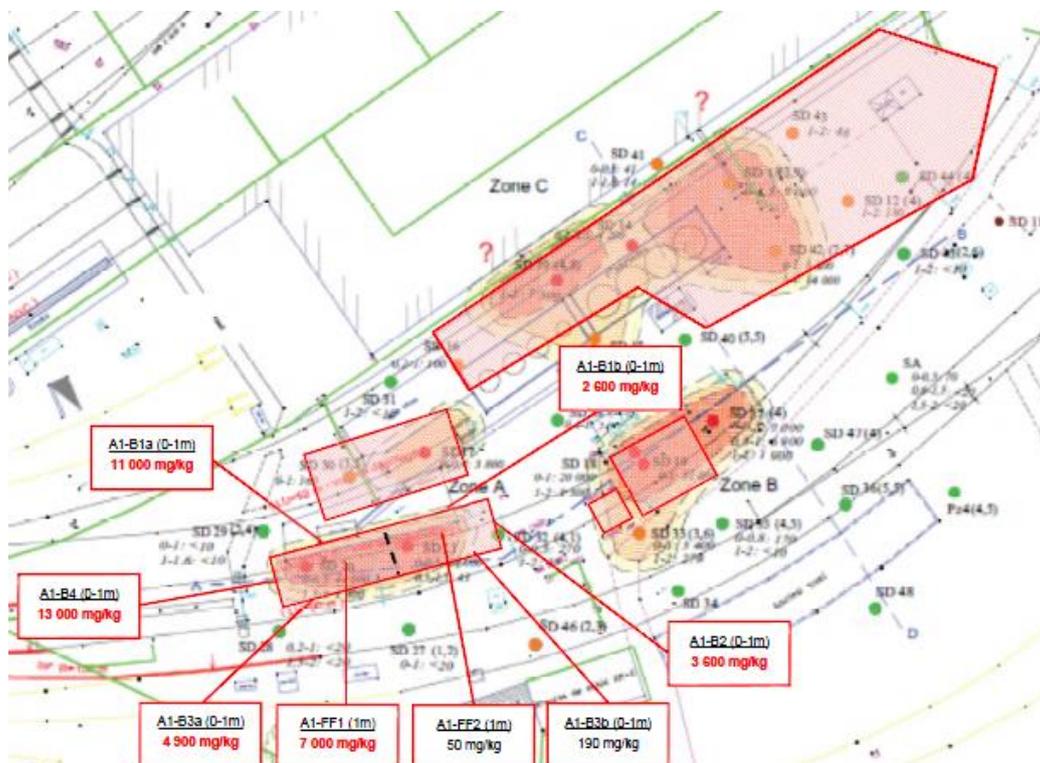


Figure 2 : Extension latérale initiale des fouilles et report des analyses sur les flancs et en fond d'une des fouilles avant reprise.

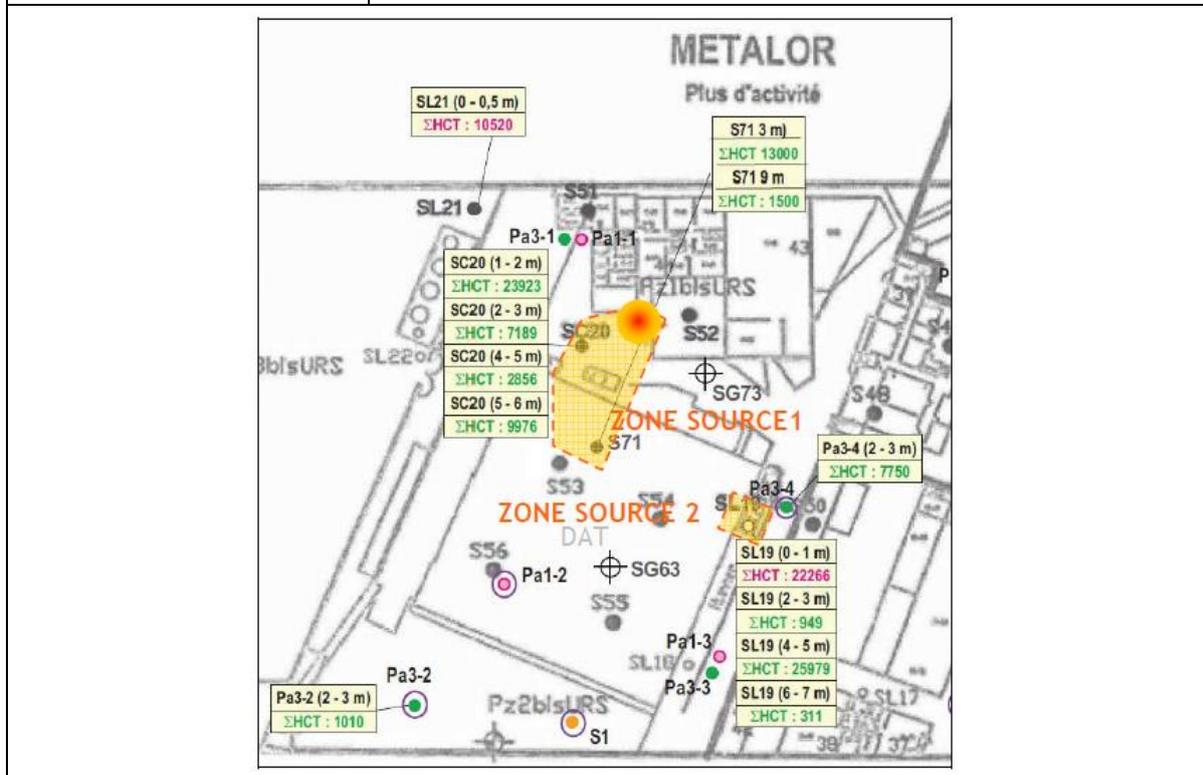
<i>Caractéristiques générales</i>													
Activité(s) à l'origine de la pollution Période(s) d'activité	Spécialité dans le traitement des métaux précieux (or, argent, platine...).												
Période(s) et durée(s) d'activité	1920 – 2008 (88 ans)												
Surface du site (parcelle)	33 000 m ²												
Types de substances justifiant une dépollution	Amiante et chrome dans les bâtiments à démolir, hydrocarbures, et métaux dans les sols, localement du flottant												
Gammes de concentrations par milieu atteint (sol, eau souterraine, eau surface, air intérieur, sédiments,...) Exploitant 1	Sur plateforme : <table border="1" style="margin-left: 40px;"> <thead> <tr> <th colspan="2">HCT dans les sols en mg/kg ms</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Nombre</td> <td>20</td> </tr> <tr> <td>Minimum</td> <td>20</td> </tr> <tr> <td>Moyenne</td> <td>5662</td> </tr> <tr> <td>Médiane</td> <td>630</td> </tr> <tr> <td>Maximum</td> <td>25</td> </tr> </tbody> </table>	HCT dans les sols en mg/kg ms		Nombre	20	Minimum	20	Moyenne	5662	Médiane	630	Maximum	25
HCT dans les sols en mg/kg ms													
Nombre	20												
Minimum	20												
Moyenne	5662												
Médiane	630												
Maximum	25												
Types de terrains atteints par la pollution	Succession lithologique sédimentaire compose de remblais anthropiques jusque 3 m d'épaisseur, puis des dépôts alluvionnaires modernes essentiellement des marnes sablo-argileuses infragypseuses, avec quelques passes plus compactes de 2 à 7m d'épaisseur. Un socle calcaire (calcaires de Saint Ouen) constitué d'alternances de bancs calcaires très compactes et de marnes délités.												
Caractéristiques de la (des) nappe (s) atteinte (s) par la pollution	Phase flottante observée au toit de la nappe au droit de 3 ouvrages Pollution peu mobile et difficilement mobilisable												
Occupation du site et de ses environs	Au cœur d'un territoire à fort potentiel (proximité du canal et des pôles de transport), le périmètre de l'ancienne usine est inclus dans une zone d'aménagement concerté. Au stade actuel du projet, le programme prévoit sur le site la construction de logements, au cœur d'un vaste espace extérieur végétalisé, avec des commerces. Une zone de stationnement est aussi prévue pour répondre aux besoins des futurs habitants et usagers, ainsi que la possible implantation de bâtiments logistiques.												

<i>Etudes et travaux réalisés sur le site pollué</i>	
Décembre 2000 Sur les 3 parcelles (exploitants 1, 2 et 3)	18 sondages de sol ainsi que 2 prélèvements d'eau dans 2 puits présents sur site. Programme analytique : HCT, COHV et les métaux dans les sols et les eaux souterraines. Cyanures dans les sols. Résultats d'analyses : dans les sols au droit du site des métaux et des COHV jusqu'à 2,5 mètres de profondeur. Concernant les hydrocarbures, trois zones impactées ont été identifiées, au niveau d'une ancienne cuve de fioul lourd (1 sondage) et au niveau d'une ancienne cuve de fioul domestique (1 sondage). Des hydrocarbures ont été mesurés jusqu'à 6 mètres de profondeur. La troisième zone impactée par des hydrocarbures se trouve au nord-ouest du site (1 sondage). Cette zone n'est pas comprise dans l'emprise du futur projet d'aménagement. Concernant les eaux souterraines, un impact en chlorure de vinyle a été

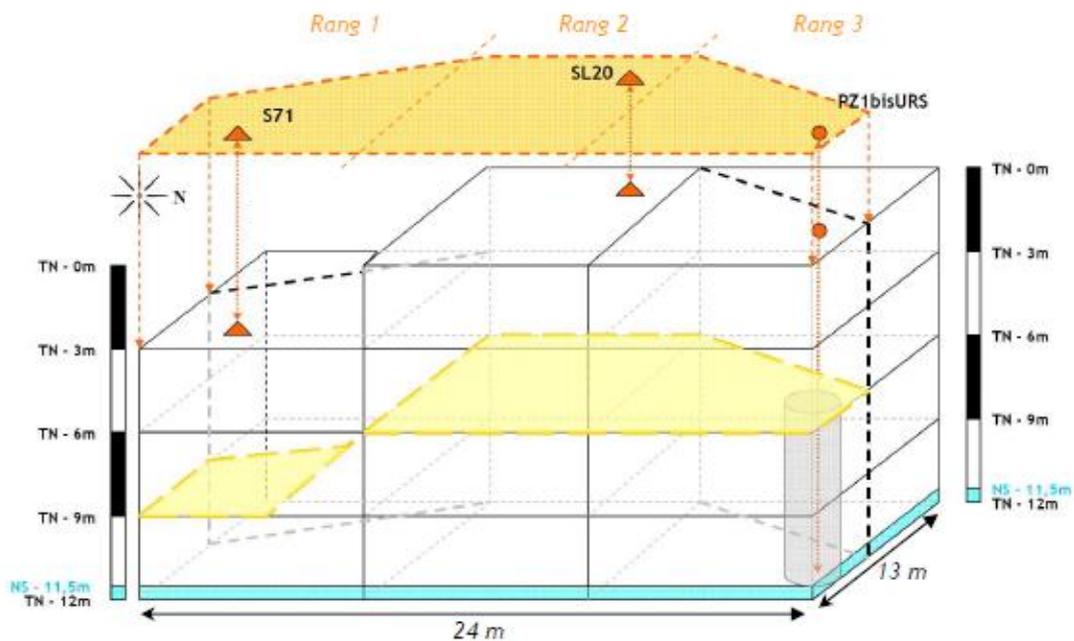
	mis en évidence.
Novembre 2002	Réalisation de 10 sondages sur la parcelle de l'exploitant 2
Mars 2003	Réalisation de 2 piézomètres sur les parcelles des exploitants 2 et 3 Mise en évidence de la présence d'HC au droit d'un piézomètre ainsi que la présence de métaux (cuivre et nickel) à l'état de trace.
Février 2005	Réalisation de 10 sondages
Novembre 2005	Réalisation de 3 piézomètres sur les parcelles 2 et 3
Janvier 2006	Réalisation de 3 piézomètres sur la parcelle 1
2006 sur les parcelles 1 et 2	10 sondages de sol et 2 prélèvements de gaz du sol. Présence de remblais superficiels contenant des sables de fonderie et des mâchefers au droit du site. Les résultats d'analyses montrent que les sols sont impactés par des métaux, des HC, des COHV, des BTEX et des PCB. Concernant les gaz du sol, du mercure volatil a été mesuré en un point de mesure
Septembre 2007 sur les parcelles 1, 2 et 3	Conformément au projet de l'arrêté préfectoral relatif au site (envers l'exploitant), des prélèvements d'eau ont été effectués sur 8 piézomètres suivants : Les analyses effectuées sur les eaux souterraines pour cette étude ont porté sur les HCT, les COHV et les BTEX. Lors de cette campagne une phase flottante a été constatée en 1 piézomètre. Cette étude a mis en évidence la présence de benzène et de certains COHV dans les eaux souterraines au droit du site ainsi que la présence d'un pic ponctuel en TCE en un sondage.
Juillet 2008 sur les parcelles 1 et 2	15 nouveaux sondages 10 prélèvements de sol afin d'analyser les HCT, les COHV, les HAP, les BTEX et les métaux ; 2 prélèvements d'eau souterraine en 2 piézomètres afin d'analyser les HCT, les COHV et les BTEX ; 2 prélèvements d'air ambiant dans deux bâtiments du site afin d'analyser les COHV, les BTEX et le naphtalène. Les résultats sur les sols ont mis en évidence : la présence de remblais sableux noirs au droit de l'ensemble des zones reconnues ; une contamination des sols par des solvants chlorés sur la quasi-totalité du site sur 1 à 2 mètres voir jusqu'à 3 mètres de profondeur ; une contamination des sols par les métaux sur la quasi-totalité du site sur 1 à 2 mètres voire jusqu'à 3 mètres de profondeur. Les résultats d'analyses sur les eaux souterraines montrent : des concentrations inférieures aux seuils réglementaires eau brute (pour les hydrocarbures uniquement) ; la présence d'irisations à la surface de l'eau lors de la purge d'un ouvrage ; une teneur significative en benzène en un autre ; des teneurs significatives en COHV au droit de 2 piézomètres. L'analyse des substances chlorées, notamment par la présence de chlorure de vinyle, tend à montrer que les COHV sont en phase de dégradation biologique. Les résultats d'analyse sur l'air ambiant montrent : la présence de BTEX et de COHV ; une teneur en benzène supérieure à la valeur guide OMS mais inférieure à la valeur réglementaire française.
Etudes et travaux réalisés sur le site pollué	
Décembre 2009 sur les parcelles 1, 2 et 3	35 sondages de sols Air du sol : 30 sondages de sols ont été équipés en piezairs.

	<p>Réalisation de prélèvements de sols sur l'ensemble du site jusqu'à une profondeur de 3 mètres, d'implantation de piez-air à 1 et 3 mètres de profondeur et de prélèvements d'air du sol.</p> <p>Ces investigations complémentaires ont confirmé la présence de métaux lourds, d'hydrocarbures totaux, d'HAP dans les sols. Les analyses d'air du sol ont révélé la présence de COHV et benzène dans les gaz du sol volatils, avec des concentrations plus élevées généralement à 3 mètres de profondeur qu'à un mètre.</p>
--	---

Caractéristiques de la dépollution	
Type(s) de dépollution	<p>l'extraction et le tri, le traitement sur site des terres impactées par des hydrocarbures et/ou leur élimination hors site ;</p> <p>l'écrouissage de la nappe pour éliminer autant que faire se peut les hydrocarbures surnageant ;</p> <p>l'évacuation de la totalité des déchets générés par la dépollution et le chantier, dans des filières autorisées</p>
Technique(s) de dépollution	<p>Biotraitement sur site, teneurs en HCT < à 15000 mg/kg</p> <p>Evacuation des terres hors site, teneurs en HCT > à 15000 mg/kg</p>
Description détaillée des objectifs fixés à la dépollution	<p>Les objectifs seront de deux ordres :</p> <ul style="list-style-type: none"> • excaver les sols au droit des deux cuves jusqu'à une teneur résiduelle sur le site de 2000 mg/kg, par mesure des hydrocarbures sur les bords et fonds de fouilles, • traiter les sols pour un remblayage ultérieur sur le site, <ul style="list-style-type: none"> ✓ avec une teneur résiduelle en composés organiques halogénés de 1mg/kg, ✓ avec une teneur résiduelle en hydrocarbures inférieure à 500 mg/kg pour les terres qui seront remblayées entre 0 et 3,5 m de profondeur, ✓ avec une teneur résiduelle en hydrocarbures inférieure à 2000 mg/kg pour les terres qui seront remblayées entre 3,5 et 6 m de profondeur.



<i>Estimations des quantités et localisation de la pollution en diagnostic</i>									
Type de méthode d'estimation utilisée	Empirique : interpolation par tracé manuel de points de mesure (Csols) sur la base des résultats des analyses sols et de la localisation des cuves enterrées								
Méthode précise d'estimation	Détermination de la zone concernée par des teneurs en hydrocarbures totaux (C10-C40) > à 2000 mg/kg								
Dimension	3D								
Spécificités des données utilisées	<table border="1"> <tr> <td>Nombre</td> <td>20 sondages</td> </tr> <tr> <td>Types</td> <td>Analyses labo des HCT dans les sols</td> </tr> <tr> <td>Support</td> <td>1 échantillon par mètre</td> </tr> <tr> <td>Répartition dans l'espace</td> <td>Répartition irrégulière des sondages à la tarière (pm peu de BTEX) en fonction de la localisation des cuves et des bâtiments Echantillons prélevés de manière systématique sur la verticale : 1 par mètre, jusqu'à 10 m de profondeur. Echantillons plus nombreux à faible profondeur (< 5 m).</td> </tr> </table>	Nombre	20 sondages	Types	Analyses labo des HCT dans les sols	Support	1 échantillon par mètre	Répartition dans l'espace	Répartition irrégulière des sondages à la tarière (pm peu de BTEX) en fonction de la localisation des cuves et des bâtiments Echantillons prélevés de manière systématique sur la verticale : 1 par mètre, jusqu'à 10 m de profondeur. Echantillons plus nombreux à faible profondeur (< 5 m).
Nombre	20 sondages								
Types	Analyses labo des HCT dans les sols								
Support	1 échantillon par mètre								
Répartition dans l'espace	Répartition irrégulière des sondages à la tarière (pm peu de BTEX) en fonction de la localisation des cuves et des bâtiments Echantillons prélevés de manière systématique sur la verticale : 1 par mètre, jusqu'à 10 m de profondeur. Echantillons plus nombreux à faible profondeur (< 5 m).								
Données indirectes utilisées dans l'estimation ?	non								
Densité des données utilisées	Faible, moins de 1 échantillon / 400 m ²								



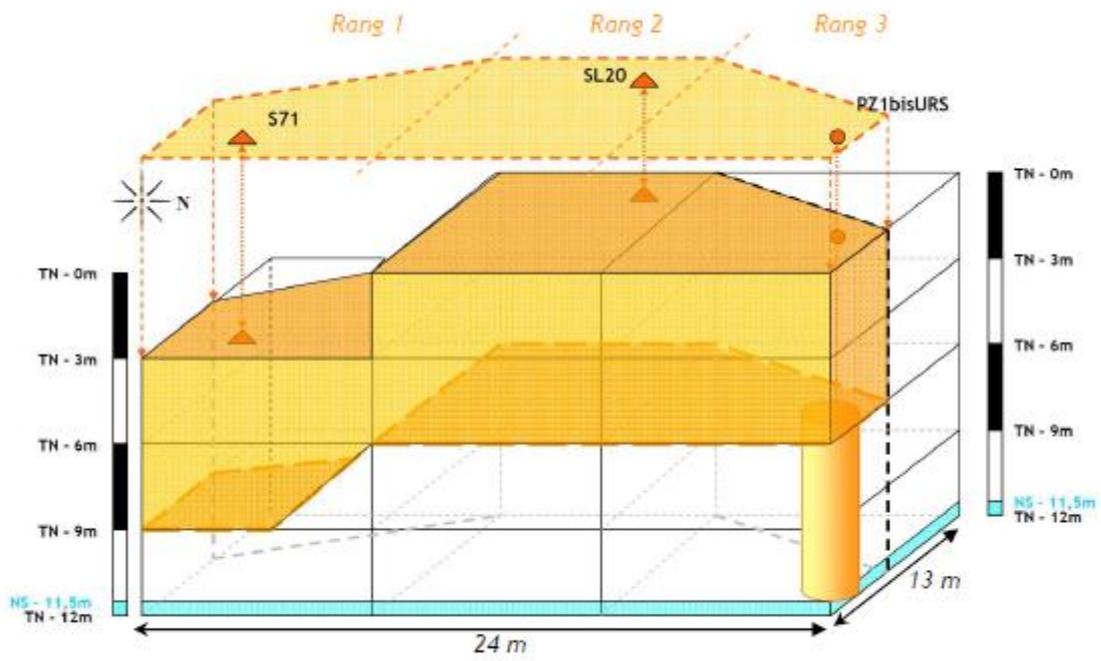


Figure 12 : Modèle des volumes impactés à terrasser

En tenant compte de la présence d'un sous-sol au droit du sondage S71, et en considérant l'emprise présentée précédemment, il convient de noter les éléments suivants :

- Une box du rang 2 représente un volume unitaire de 13m (l) x 8m (L) x 3m (h) soit **312 m³**
- Une box du rang 1 représente un volume unitaire de 13m (l) x 8m (L) x 3m (h) soit 312 m³ diminué du volume du triangle sud-ouest non excavé de 8m de côté (soit [(8m x 8m)/2] x 3m soit 96 m₃) soit **216 m³**.
- La box de fond du rang 1 (-6 -9m) est également diminuée du talus latéral de 3m de côté (pente 1/1), soit du volume de [(3m x 3m)/2] x 13m = 58m³, soit au total **158 m³**.
- Une box du rang 3 représente un volume unitaire de 13m (l) x 8m (L) x 3m (h) soit 312 m³ diminué du volume du triangle nord-ouest non excavé de 8m de côté (soit [(8m x 8m)/2] x 3m soit 96 m₃) soit **216 m³**.

Au total, le volume total V1 des matériaux en place à excaver et à traiter au droit de la zone 1 identifiée comme impactée s'exprime :

$$V1 = V_{\text{Box Rang 1}} + V_{\text{Box Rang 2}} + V_{\text{Box Rang 3}}$$

Avec :

$$\begin{aligned} V_{\text{Box Rang 1}} &= 216 + 158 = 374 \text{ m}^3 \\ V_{\text{Box Rang 2}} &= 312 \times 2 = 624 \text{ m}^3 \\ V_{\text{Box Rang 3}} &= 216 \times 2 = 432 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Soit le volume total à excaver au droit de la zone source 1, **V1 = 1 428 m³**

• Zone source 2

Le terrassement de la deuxième zone source est centré autour du point de sondage SL19. Le CCTP précise que l'extension de cette excavation couvrira une surface de 5m x 5m soit 25 m². Des impacts ont été identifiés entre 1 et 2 m de profondeur et localement jusqu'à 5-6m de profondeur. Par ailleurs, à 6m de profondeur, la teneur en hydrocarbures est inférieure au seuil fixé dans les ISDI (<500 mg/kg MS).

Aussi, un volume V à terrasser de 25 x 6m soit 150 m³ est à envisager pour la purge de cette zone source. Il est à préciser que les tranches 2 à 4m ne présentent a priori pas d'impact en hydrocarbures au-delà des seuils fixés pour ce site (2000 mg/kg MS). Ainsi, un volume de **100 m³** de terres issues de cette zone 2 est à traiter.

Le volume total de terres polluées à excaver s'exprime :

$$V_{\text{TOTAL}} = V1 + V2 = 1428 + 100 = 1 528 \text{ m}^3$$

<i>Estimations des quantités et localisation de la pollution en dépollution</i>									
Méthode d'estimation utilisée	Tri et contrôle de la qualité par PID, et pétroflag sur tas ou dans la pelle 1chantillon/25 m ³ Comptage des volumes excavés à l'avancement								
Spécificités des données utilisées	<table border="1"> <tr> <td>Nombre</td> <td>11 sur Zone 1 ; 8 sur Zone 2</td> </tr> <tr> <td>Types</td> <td>1) Sol en fond de fouilles 2) Sol en bords de fouilles</td> </tr> <tr> <td>Support</td> <td>Zone 1 : 1 échantillon par mètre chaque les bords de fouilles, et 1 échantillon /100 m2 en fond de fouille Zone 2 : 4 bords de fouilles 4 fonds de fouilles</td> </tr> <tr> <td>Répartition dans l'espace</td> <td>Echantillons moyens réalisés à partir de l'assemblage de 10 aliquottes sur chaque surface (pas de problème car HCT peu volatils)</td> </tr> </table>	Nombre	11 sur Zone 1 ; 8 sur Zone 2	Types	1) Sol en fond de fouilles 2) Sol en bords de fouilles	Support	Zone 1 : 1 échantillon par mètre chaque les bords de fouilles, et 1 échantillon /100 m2 en fond de fouille Zone 2 : 4 bords de fouilles 4 fonds de fouilles	Répartition dans l'espace	Echantillons moyens réalisés à partir de l'assemblage de 10 aliquottes sur chaque surface (pas de problème car HCT peu volatils)
Nombre	11 sur Zone 1 ; 8 sur Zone 2								
Types	1) Sol en fond de fouilles 2) Sol en bords de fouilles								
Support	Zone 1 : 1 échantillon par mètre chaque les bords de fouilles, et 1 échantillon /100 m2 en fond de fouille Zone 2 : 4 bords de fouilles 4 fonds de fouilles								
Répartition dans l'espace	Echantillons moyens réalisés à partir de l'assemblage de 10 aliquottes sur chaque surface (pas de problème car HCT peu volatils)								

<i>Comparaison des estimations de diagnostic et résultats de dépollution</i>					
Estimation globale (masses de polluants, volumes ou tonnages de terres par filière, etc...)	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Diagnostic</th> <th>Dépollution (bilan de masse)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Masse de terres initiale à traiter: - 2956 m3 sur la base d'une interpolation manuelle de points - 4000 à 4300 m3 à excaver, par talutage (comptage de camions et relevé topographique de fouilles)</td> <td>Masse de terres extraite : - 2335 m3 Méthode manuelle avec relevé topographique</td> </tr> </tbody> </table>	Diagnostic	Dépollution (bilan de masse)	Masse de terres initiale à traiter: - 2956 m3 sur la base d'une interpolation manuelle de points - 4000 à 4300 m3 à excaver, par talutage (comptage de camions et relevé topographique de fouilles)	Masse de terres extraite : - 2335 m3 Méthode manuelle avec relevé topographique
Diagnostic	Dépollution (bilan de masse)				
Masse de terres initiale à traiter: - 2956 m3 sur la base d'une interpolation manuelle de points - 4000 à 4300 m3 à excaver, par talutage (comptage de camions et relevé topographique de fouilles)	Masse de terres extraite : - 2335 m3 Méthode manuelle avec relevé topographique				
Estimation locale (localisation des zones les plus polluées)	Pas de contrôle hors des zones les plus polluées, limitation des réceptions au fond et bord de fouilles.				
Appréciation du donneur d'ordre sur ces résultats	Satisfaction du client sur la justesse du volume traité				
Appréciation du bureau d'étude/de la société de dépollution sur ces résultats	Densité d'échantillonnage trop faible selon nous pour commencer le traitement. Chantier à risque, nous refusons alors de réaliser des investigations hors zone à traiter, car le client demande de traiter uniquement les zones sources identifiées. Mais tri très précis en cours de traitement pour limiter les volumes				
Impacts des écarts éventuels					

<i>Avis d'expert sur les raison des écarts ou similitudes observés entre estimations de diagnostic et résultats de dépollution</i>	
Liste hiérarchisée des éléments pouvant expliquer les écarts ou la similitude des résultats	L'erreur d'estimation est de 27% en surestimation. Plusieurs facteurs sont défavorables à une bonne estimation : - Les investigations de diagnostic ne remplissent pas 2 des 5

	<p>facteurs identifiés comme éléments favorables à la réduction des écarts. Il s'agit de la densité d'échantillonnage, nettement insuffisante (1 sondage pour 1650 m², au lieu d'un minimum de 1 pour 100 m²), et du recouvrement de la zone (zones lacunaires et sur-échantillonnées).</p> <ul style="list-style-type: none"> - L'estimation de diagnostic a été réalisée par jugement d'expert seul. - Le cas est moyennement complexe (sachant que tous les sites de l'étude sont complexes), un seul type de substances (HC) donnant lieu à une dépollution, mais dans un terrain hétérogène, - La fiabilité des résultats de dépollution est médiocre, dans la mesure où des contrôles ont été menés en bordure, en fond et dans la zone d'intérêt, mais pas en dehors (choix délibéré du BE en charge du suivi de la dépollution, compte-tenu des lacunes des investigations de diagnostic),
<p>Suggestion d'amélioration des estimations (diagnostic/dépollution)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - La densité d'échantillonnage dans le plan est à augmenter drastiquement. - Le recouvrement de la zone d'intérêt par les sondages doit être assuré. - Le jugement d'expert pourrait être utilement complété par une méthode d'interpolation.

<i>Caractéristiques générales</i>	
Activité(s) à l'origine de la pollution	Ancienne chaudronnerie
Période(s) et durée(s) d'activité	1954 - 2009 (55 ans)
Surface du site (parcelle(s))	4971 m ²
Types de substances justifiant une dépollution	Hydrocarbures pétroliers
Gammes de concentrations par milieu atteint (sol, eau souterraine, eau surface, air intérieur, sédiments,...)	Sol : C10 – C40 Max 11000 mg/kg ms, Métaux Cr 790 mg/kg ms et Ni 390 mg/kg ms
Types de terrains atteints par la pollution	Terrains alluvionnaires (sables graveleux), recouverts par 1 m de remblais limoneux à graviers
Caractéristiques de la (des) nappe(s) atteinte(s) par la pollution	Nappe dont le niveau statique a été mesuré à 15 m
Occupation du site et de ses environs	Zone urbaine

<i>Etudes et travaux réalisés sur le site pollué</i>	
2012 - 2013	Diagnostic (évaluation environnementale) en 2 phases de sondages et prélèvements
2014	Dépollution par excavation et tri des sols Excavation complémentaire pour élimination de contaminations résiduelles non conformes

<i>Caractéristiques de la dépollution</i>	
Type(s) de dépollution	Hors site par excavation des terres
Technique(s) de dépollution	Excavation et tri pour élimination en décharge
Description détaillée des objectifs fixés à la dépollution	<p>Objectifs fixés égaux aux critères d'acceptation en Installations de Stockage de Déchets Inertes (ISDI = classe 3) :</p> <p>C10-C40 < 500 mg/kg ms.</p> <p>Evaluation du respect de ces objectifs en bords et fonds de fouilles, ainsi que du respect des valeurs de bruit de fond géochimique ou bruit de fond urbain :</p> <p>C10-C40 < 190 mg/kg ms. Cr < 150 mg/kg ms. Ni < 130 mg/kg ms.</p> <p>Analyse des risques résiduels en cas de contamination résiduelle significative pour les prélèvements en fond de fouille réalisés à la cote du projet.</p>
<i>Estimations des quantités et localisation de la pollution en diagnostic</i>	

Type de méthode d'estimation utilisée	Jugement d'expert								
Méthode précise d'estimation	Délimitation de rectangles dans 6 couches de 1 m d'épaisseur, dans lesquels les teneurs en C10-C40 dépassent l'objectif de dépollution. Seules les 3 premières couches sont excavées, pour les besoins du projet immobilier.								
Dimension	En 6 couches de 1 m d'épaisseur (2D)								
Spécificités des données utilisées	<p>Diagnostic :</p> <p>16 sondages de 3 m de prof. max.</p> <p>18 sondages de 6 m de prof. max.</p> <p>4 sondages piézométriques de 19 m.</p> <p>86 échantillons de sol au total analysés au laboratoire</p> <p>1 à 5 échantillons par sondage, sur la verticale</p> <table border="1"> <tr> <td>Nombre</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Types</td> <td>Analyse labo dans le sol : C10-C40 (avec différentes fractions de C10 à C40) et métaux Analyse également des HAP, BTEX, COHV et PCB sur certains des 12 échantillons de la première phase 2 laboratoires différents pour la réalisation des analyses</td> </tr> <tr> <td>Support</td> <td>Taille des échantillons d'environ 1 m, mais pouvant pour certains être inférieure ou supérieure. A minima 1 échantillon par mètre : homogénéisation de la carotte de terres si même type de sol et en l'absence d'indice organoleptique. Si sur le mètre prélevé, présence de 2 types de sols ou d'une couche avec un indice organoleptique particulier, constitution de 2 échantillons.</td> </tr> <tr> <td>Répartition dans l'espace</td> <td>Répartition dans tout le domaine à caractériser, assez régulière (~maille carrée), avec des zones lacunaires (sans sondages)</td> </tr> </table>	Nombre		Types	Analyse labo dans le sol : C10-C40 (avec différentes fractions de C10 à C40) et métaux Analyse également des HAP, BTEX, COHV et PCB sur certains des 12 échantillons de la première phase 2 laboratoires différents pour la réalisation des analyses	Support	Taille des échantillons d'environ 1 m, mais pouvant pour certains être inférieure ou supérieure. A minima 1 échantillon par mètre : homogénéisation de la carotte de terres si même type de sol et en l'absence d'indice organoleptique. Si sur le mètre prélevé, présence de 2 types de sols ou d'une couche avec un indice organoleptique particulier, constitution de 2 échantillons.	Répartition dans l'espace	Répartition dans tout le domaine à caractériser, assez régulière (~maille carrée), avec des zones lacunaires (sans sondages)
Nombre									
Types	Analyse labo dans le sol : C10-C40 (avec différentes fractions de C10 à C40) et métaux Analyse également des HAP, BTEX, COHV et PCB sur certains des 12 échantillons de la première phase 2 laboratoires différents pour la réalisation des analyses								
Support	Taille des échantillons d'environ 1 m, mais pouvant pour certains être inférieure ou supérieure. A minima 1 échantillon par mètre : homogénéisation de la carotte de terres si même type de sol et en l'absence d'indice organoleptique. Si sur le mètre prélevé, présence de 2 types de sols ou d'une couche avec un indice organoleptique particulier, constitution de 2 échantillons.								
Répartition dans l'espace	Répartition dans tout le domaine à caractériser, assez régulière (~maille carrée), avec des zones lacunaires (sans sondages)								
Densité des données utilisées	Volume concerné : surface du site 4971 m ² x 6 m = 29826 m ³ de sol 1 donnée C10-C40 pour 58 m ² , 1 donnée C10-C40 pour 347 m ³								
Données indirectes utilisées dans l'estimation ?	Non								

Estimations des quantités et localisation de la pollution en dépollution

Méthode d'estimation utilisée	Excavation dans 4 zones (zone de fosses, cuve de fuel, ouest d'un bâtiment) Volume pollué excavé calculé par comptage des camions. Pas d'analyse des sols à l'intérieur des zones. Quelques contrôles dans les camions à l'arrivée dans la décharge.
-------------------------------	---

	<p>Contrôle de l'absence de pollution résiduelle en paroi et fond de fouilles. Nombre de prélèvements variable selon les zones.</p> <p>Dans la zone de la cuve à fuel (évacuée) :</p> <ul style="list-style-type: none"> - 5 prélèvements en bord de fouille - 2 prélèvements en fond de fouille <p>Dans les 3 autres zones :</p> <ul style="list-style-type: none"> - 3 échantillons sur 3 des 4 parois des fouilles - 1 échantillon en fond de fouille <p>Pas de contrôle en dehors de ces zones.</p>	
Spécificités des données utilisées	Nombre	42 échantillons de parois et fonds de fouilles (29 au parois, 13 en fonds)
	Types	Analyses de laboratoire des C10-C40 et des Métaux
	Support	Prélèvements ponctuels en différents endroit de la paroi / fond de fouille, en vue de la constitution d'un échantillon moyen représentatif de la paroi / fond.
	Répartition dans l'espace	Non régulière Forte densité dans les zones polluées

<i>Comparaison des estimations de diagnostic et résultats de dépollution</i>	
Estimation globale (masses de polluants, volumes ou tonnages de terres par filière, etc...)	<p>Diagnostic : 1430 m³, soit 2574 tonnes (d=1.8)</p> <p>Dépollution : 1504 m³, soit 2707 tonnes</p> <p>Différence : 133 tonnes</p> <p>Rq. : découverte en fond de fouille de pollution résiduelle, dont une partie a été purgée (volumes inclus dans le volume indiqué ci-dessus). Une partie reste en place après vérification par une analyse des risques résiduels que les risques sont négligeables pour les personnes amenées à habiter dans les futurs bâtiments. Quantités non estimées.</p>
Estimation locale (localisation des zones les plus polluées)	<p>Pas de contrôle à l'intérieur, ni à l'extérieur des zones.</p> <p>Seuls les fonds et parois de fouilles ont été contrôlés : certaines d'entre elles montrent une contamination plus profonde que prévu en diagnostic.</p>
Appréciation du donneur d'ordre sur ces résultats	
Appréciation du bureau d'étude/de la société de dépollution sur ces résultats	Ecart acceptable (~5%)
Impacts des écarts éventuels	Surcoût lié à l'élimination de terres polluées en centre adapté.

Avis d'expert sur les raisons des écarts ou similitudes observés entre estimations de diagnostic et résultats de dépollution

<p>Liste hiérarchisée des éléments pouvant expliquer les écarts ou la similitude des résultats</p>	<p>L'erreur d'estimation est très faible : 5% en sous-estimation.</p> <p>Cet excellent résultat doit cependant être modéré par le fait que le résultat de dépollution, considéré comme la référence, est peu fiable. En effet, seuls des contrôles ont été effectués en bordure et au fond de la zone d'intérêt, mais pas à l'intérieur ni à l'extérieur de la zone.</p> <p>En dépit de cette nuance, plusieurs facteurs semblent pouvoir expliquer ce bon résultat :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Le cas est relativement simple (sachant que tous les sites de l'étude sont complexes), un seul type de substances (HC). - Le nombre d'échantillons sur la verticale est élevé (1 échantillon pour 0.5 m, soit plus que 1 échantillon par m recommandé), le protocole de prélèvement est homogène, et l'échantillonnage sur la verticale est systématique et orienté. <p>Certains facteurs sont défavorables à une bonne estimation, mais semblent être compensés par le caractère relativement simple de la situation de pollution :</p> <ul style="list-style-type: none"> - La densité de sondages est faible, de 1 sondage pour 146 m², soit nettement inférieure au 1 pour 100 m² recommandé), - Le recouvrement de la zone n'est pas assuré, des secteurs étant sur- ou sous-échantillonnés. - L'estimation a été menée par un jugement d'expert seul.
<p>Suggestion d'amélioration des estimations (diagnostic/dépollution)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - La fiabilité des résultats de dépollution gagnerait à être augmentée par des contrôles à l'intérieur et à l'extérieur de la zone d'intérêt.

<i>Caractéristiques générales</i>	
Activité(s) à l'origine de la pollution	Ancienne station de lavage et station-service
Période(s) et durée(s) d'activité	Jusqu'en 1986
Surface du site (parcelle(s))	1122 m ²
Types de substances justifiant une dépollution	Hydrocarbures lourds, HAP, BTEX
Gammes de concentrations par milieu atteint (sol, eau souterraine, eau surface, air intérieur, sédiments,...)	Sol : C10-C40 4800 – 59000 mg/kg ms, HAP 15 – 63 mg/kg ms 16 US EPA, et BTEX 13 – 210 mg/kg ms Eaux souterraines : hydrocarbures en phase à la surface de la nappe (77500 microg/L C10-C40, 56 microg/L HAP, 25 microg/L BTEX)
Types de terrains atteints par la pollution	Sables graveleux (terrains alluvionnaires)
Caractéristiques de la (des) nappe(s) atteinte(s) par la pollution	Nappe dont le niveau statique a été constaté à 4.2 m de prof
Occupation du site et de ses environs	Zone urbaine

<i>Etudes et travaux réalisés sur le site pollué</i>	
2012	Diagnostic en 2 phases par un premier bureau d'étude, avec réalisation de sondages et prélèvements
2014	Sondages complémentaires par le second bureau d'étude (AMO), pour vérifier l'extension de la zone polluée, et par l'entreprise de dépollution, pour vérifier les niveaux de concentration des terres à traiter Dépollution par excavation et tri des sols Analyse des risques résiduels liés aux contaminations résiduelles

<i>Caractéristiques de la dépollution</i>	
Type(s) de dépollution	Hors site par excavation des terres, après rabattement de la nappe
Technique(s) de dépollution	Excavation et tri pour traitement hors site par désorption thermique et voie biologique
Description détaillée des objectifs fixés à la dépollution	Objectifs fixés égaux aux critères d'acceptation en Installations de Stockage de Déchets Inertes (ISDI = classe 3) : C10-C40 < 500 mg/kg ms. HAP < 50 mg/kg ms. BTEX < 6 mg/kg ms. Evaluation du respect de ces objectifs en bords et fonds de fouilles, ainsi que du respect des valeurs de bruit de fond géochimique ou bruit de fond urbain : C10-C40 < 190 mg/kg ms. HAP < 3.3 mg/kg ms.

	<p>Pas de valeur pour les BTEX.</p> <p>Analyse des risques résiduels en cas de contamination résiduelle significative pour les prélèvements en fond de fouille réalisés à la cote du projet.</p>
--	---

<i>Estimations des quantités et localisation de la pollution en diagnostic</i>									
Type de méthode d'estimation utilisée	Jugement d'expert								
Méthode précise d'estimation	Délimitation d'un rectangle dans 1 couche de 3 m d'épaisseur (à partir de 2.2 m de la surface du sol, fouille de pré-terrassement), dans lesquels les teneurs dépassent les objectifs de dépollution.								
Dimension	1 couche de 3 m d'épaisseur (2D)								
Spécificités des données utilisées	<p>Diagnostic premier BE :</p> <ul style="list-style-type: none"> - 10 sondages de 1.5 m de prof, à partir de la surface initiale du site - 10 sondages de 2 m de prof, à partir du fond de fouille de pré-terrassement (2.2 m par-rapport à la surface du site) - 20 échantillons de sol au total analysés au laboratoire - 1 échantillon par sondage, sur la verticale (10 prélevés entre 0 et 1.5 m de prof, 10 entre 2.2 et 4.2 m de prof, par rapport à la surface du site). <p>Entreprise de dépollution (pas utilisé dans l'estimation) :</p> <ul style="list-style-type: none"> - 2 sondages de 3 m par-rapport au fond de fouille (pré-terrassements) à la pelle mécanique, 1 échantillon composite par sondage. <p>Second BE (AMO) (pas utilisé dans l'estimation) :</p> <ul style="list-style-type: none"> - 3 sondages à la pelle mécanique, 1 échantillon composite dans chaque sondage. - 3 prélèvements d'eau de nappe en fond de fouille. <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 30%;">Nombre</td> <td>20 échantillons de sol</td> </tr> <tr> <td>Types</td> <td>Analyse labo dans le sol : C10-C40, HAP, BTEX, PCB</td> </tr> <tr> <td>Support</td> <td>Pas d'informations à ce sujet dans le rapport</td> </tr> <tr> <td>Répartition dans l'espace</td> <td>Pas d'informations à ce sujet dans le rapport</td> </tr> </table>	Nombre	20 échantillons de sol	Types	Analyse labo dans le sol : C10-C40, HAP, BTEX, PCB	Support	Pas d'informations à ce sujet dans le rapport	Répartition dans l'espace	Pas d'informations à ce sujet dans le rapport
Nombre	20 échantillons de sol								
Types	Analyse labo dans le sol : C10-C40, HAP, BTEX, PCB								
Support	Pas d'informations à ce sujet dans le rapport								
Répartition dans l'espace	Pas d'informations à ce sujet dans le rapport								
Densité des données utilisées	<p>Volume concerné : surface du site 1122 m² x 5.2 m = 5834 m³</p> <p>1 donnée pour 56 m², 1 donnée pour 292 m³</p>								
Données indirectes utilisées dans l'estimation ?	Non								

<i>Estimations des quantités et localisation de la pollution en dépollution</i>	
Méthode d'estimation utilisée	<p>Excavation dans 1 zone (divisée en 5 mailles)</p> <p>Volume pollué excavé calculé par comptage des camions.</p> <p>Pas d'analyse systématique des sols à l'intérieur des zones.</p>

	<p>Contrôle de l'absence de pollution résiduelle en paroi et fond de fouilles. Contrôles variables suivant les mailles :</p> <ul style="list-style-type: none"> - 2 prélèvements sur une paroi de fouille (représentatifs de 1 et 1.4 m d'épaisseur) pour 1 maille - 1 prélèvement sur une seule paroi pour 1 maille - 6 prélèvements de fond de fouille avant l'arrêt du rabattement de la nappe - 8 prélèvements en parois de fouille - 1 prélèvement dans les terres de surface, excavées pour accéder aux terres polluées (en tas) - 8 prélèvements en fond de fouille définitif, après l'arrêt du rabattement de la nappe, à 4.6 m de prof par-rapport à la surface du site. 								
Spécificités des données utilisées	<table border="1"> <tr> <td data-bbox="624 689 855 797">Nombre</td> <td data-bbox="855 689 1343 797">26 échantillons de parois et fonds de fouilles (11 en parois, 6 + 8 en fonds, 1 dans les terres de surface)</td> </tr> <tr> <td data-bbox="624 797 855 875">Types</td> <td data-bbox="855 797 1343 875">Analyses de laboratoire des C5-C10, C10-C40, HAP, BTEX</td> </tr> <tr> <td data-bbox="624 875 855 1503">Support</td> <td data-bbox="855 875 1343 1503"> <p>En cours de chantier :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Maillage du fond/bords de fouille, puis prélèvements ponctuels en différents endroit de fond et de la paroi des mailles, en vue de la constitution d'un échantillon moyen représentatif de la paroi / fond de chaque maille. - Sur une paroi présentant une couche « suspecte », 2 prélèvements ont été réalisés : 1 prélèvement sur la couche « saine » et 1 prélèvement sur la couche « suspecte ». Chacun des échantillons a été constitué par des prélèvements ponctuels réalisés sur chacune des couches. <p>Sur le fond de fouille définitif, échantillons moyens réalisés par l'intermédiaire de prélèvements ponctuels</p> </td> </tr> <tr> <td data-bbox="624 1503 855 1615">Répartition dans l'espace</td> <td data-bbox="855 1503 1343 1615"> <p>Non régulière</p> <p>Essentiellement en pourtour de la zone polluée</p> </td> </tr> </table>	Nombre	26 échantillons de parois et fonds de fouilles (11 en parois, 6 + 8 en fonds, 1 dans les terres de surface)	Types	Analyses de laboratoire des C5-C10, C10-C40, HAP, BTEX	Support	<p>En cours de chantier :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Maillage du fond/bords de fouille, puis prélèvements ponctuels en différents endroit de fond et de la paroi des mailles, en vue de la constitution d'un échantillon moyen représentatif de la paroi / fond de chaque maille. - Sur une paroi présentant une couche « suspecte », 2 prélèvements ont été réalisés : 1 prélèvement sur la couche « saine » et 1 prélèvement sur la couche « suspecte ». Chacun des échantillons a été constitué par des prélèvements ponctuels réalisés sur chacune des couches. <p>Sur le fond de fouille définitif, échantillons moyens réalisés par l'intermédiaire de prélèvements ponctuels</p>	Répartition dans l'espace	<p>Non régulière</p> <p>Essentiellement en pourtour de la zone polluée</p>
Nombre	26 échantillons de parois et fonds de fouilles (11 en parois, 6 + 8 en fonds, 1 dans les terres de surface)								
Types	Analyses de laboratoire des C5-C10, C10-C40, HAP, BTEX								
Support	<p>En cours de chantier :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Maillage du fond/bords de fouille, puis prélèvements ponctuels en différents endroit de fond et de la paroi des mailles, en vue de la constitution d'un échantillon moyen représentatif de la paroi / fond de chaque maille. - Sur une paroi présentant une couche « suspecte », 2 prélèvements ont été réalisés : 1 prélèvement sur la couche « saine » et 1 prélèvement sur la couche « suspecte ». Chacun des échantillons a été constitué par des prélèvements ponctuels réalisés sur chacune des couches. <p>Sur le fond de fouille définitif, échantillons moyens réalisés par l'intermédiaire de prélèvements ponctuels</p>								
Répartition dans l'espace	<p>Non régulière</p> <p>Essentiellement en pourtour de la zone polluée</p>								

Comparaison des estimations de diagnostic et résultats de dépollution

Estimation globale (masses de polluants, volumes ou tonnages de terres par filière, etc...)	<p>Diagnostic premier bureau d'étude : 260 m² sur 3 m d'épaisseur, soit 1420 tonnes (d=1.82)</p> <p>Dépollution : 789 m³, soit 1436 tonnes (d=1.82)</p> <p>Différence : 16 tonnes</p> <p>Rq. : présence d'une pollution résiduelle dans la zone purgée, après l'arrêt du rabattement de la nappe. Elle reste en place après vérification par une analyse des risques résiduels que les risques sont négligeables pour les personnes amenées à habiter dans les futurs bâtiments.</p>
---	--

	Quantités non estimées. Pollution résiduelle dans les sols : C10-C40 5400 – 10000 mg/kg ms, Traces de HAP 1.8 à 4.9 mg/kg ms 16 US EPA, et BTEX < 10 mg/kg ms
Estimation locale (localisation des zones les plus polluées)	Pas de contrôle en dehors de la zone à purger.
Appréciation du donneur d'ordre sur ces résultats	
Appréciation du bureau d'étude/de la société de dépollution sur ces résultats	Ecart acceptable (~1%)
Impacts des écarts éventuels	

Avis d'expert sur les raisons des écarts ou similitudes observés entre estimations de diagnostic et résultats de dépollution

Liste hiérarchisée des éléments pouvant expliquer les écarts ou la similitude des résultats	<p>L'erreur d'estimation est très faible : 1% en sous-estimation.</p> <p>Cet excellent résultat doit cependant être modéré par le fait que le résultat de dépollution, considéré comme la référence, est peu fiable. En effet, seuls des contrôles ont été effectués en bordure et au fond de la zone d'intérêt, mais pas à l'intérieur ni à l'extérieur de la zone.</p> <p>En dépit de cette nuance, ce bon résultat est particulièrement méritant dans la mesure où les conditions n'étaient pas très favorables :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Le cas est moyennement complexe (sachant que tous les sites de l'étude sont complexes), car plusieurs types de substances (HC, HAP ; BTEX) en terrain hétérogène doivent être dépollués. L'étude RECORD a néanmoins montré que les cas de pollution aux HAP sont particulièrement difficiles à estimer, et montrent en général les plus grands écarts entre investigation et dépollution. - L'estimation a été réalisée par un jugement d'expert seul. <p>Certaines informations manquent pour apprécier la qualité des investigations de diagnostic. On relève cependant 2 points extrêmement positifs :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Une densité de sondages très élevée de 1 sondage pour 56 m² (soit nettement supérieure au 1 pour 100 m² recommandé), - Une densité d'échantillonnage sur la verticale très élevée (1 échantillon pour 0,20 m, soit nettement plus que l'échantillon par mètre recommandé).
Suggestion d'amélioration des estimations (diagnostic/dépollution)	<ul style="list-style-type: none"> - La fiabilité des résultats de dépollution gagnerait à être augmentée par des contrôles à l'intérieur et à l'extérieur de la zone d'intérêt.

Site S – Dépôt pétrolier – Hydrocarbures – Excavation et traitement sur site (biopile)

<i>Caractéristiques générales</i>	
Activité(s) à l'origine de la pollution – Période(s) d'activité	Dépôt pétrolier 1955-2003
Surface du site (parcelle(s))	9000 m ²
Types de substances justifiant une dépollution	Hydrocarbures dits produits « blancs » = fioul et gazole
Gammes de concentrations par milieu atteint (sol, eau souterraine, eau surface, air intérieur, sédiments,...)	HCT 2000-8000 mg/kg 1 valeur benzène > 1 µg/L dans nappe 1 valeur benzène > VME dans les gaz du sol (3,25 mg/m ³)
Types de terrains atteints par la pollution	Remblais Argiles Craie
Caractéristiques de la (des) nappe (s) atteinte (s) par la pollution	Poches d'eau, entre 0.3 et 1.4 m, particulièrement vulnérables Nappe des calcaires du Jurassique supérieur, peu vulnérable Nappe alluviale en limite de site.
Occupation du site et de ses environs	Sites industriels et voie ferrée

<i>Etudes et travaux réalisés sur le site pollué</i>	
Juillet 2000	État de pollution du sous-sol
Avril 2004	Diagnostic des sols et des eaux souterraines de l'ancien dépôt de fioul
2006	Rapports trimestriels de suivi de la qualité des eaux souterraines
Décembre 2006	Évaluation simplifiée des risques (ESR)
Mars 2007	Investigations complémentaires et pose d'ouvrages
Juillet 2007	Synthèse des diagnostics et proposition de démarche de gestion
2008-2009	Excavation + traitement sur site en biopiles
2010	Excavation complémentaire de terres

<i>Caractéristiques de la dépollution</i>	
Type(s) de dépollution	Excavation + traitement sur site
Technique(s) de dépollution	Biopile sur site (méthode avantageuse, car permet d'éviter d'évacuer les sols du site)
Description détaillée des objectifs fixés à la dépollution	HCT < 1000 mg/kg ms benzène < 1 mg/kg ms

<i>Estimations des quantités et localisation de la pollution en diagnostic</i>	
Type de méthode d'estimation utilisée	Jugement d'expert (« Patatoïdes autour de sondages »)
Méthode précise d'estimation	
Spécificités des données utilisées	Seules les données de 2007 ont été utilisées : 5 sondages à 4m de profondeur 3 piézomètres à 6m de profondeur

	3 piézairs à 2m de profondeur	
	Nombre	Foreuse, tarière hydraulique
	Types	Analyses au laboratoire des C ₆ -C ₁₀ , C ₁₀ -C ₄₀ , BTEX et HAP
	Support	
	Répartition dans l'espace	Échantillons prélevés en fonction des horizons et des indices organoleptiques
	A priori aucun échantillon de sol avec des valeurs supérieures aux VDSS	
Données indirectes utilisées dans l'estimation ?	Les données suivantes ont été recueillies, mais n'ont pas fait l'objet d'une intégration explicite dans la modélisation : <ul style="list-style-type: none"> • PID calibré sur le benzène • Tubes colorimétriques de type Dräger 	

Estimations des quantités et localisation de la pollution en dépollution

Méthode d'estimation utilisée	Contrôles visuels + analyses sur tas
Spécificités des données utilisées	Echantillons sur tas avec a minima deux mesures à plusieurs intervalles sur les tas qui dégazent une grande partie de leur charge polluante. En outre, les produits comme les essences descendent par gravité en bas du tas. Ces produits légers mobiles sont dénommés « blancs » par les chimistes pétroliers.

Comparaison des estimations de diagnostic et résultats de dépollution

Estimation globale (masses de polluants, volumes ou tonnages de terres par filière, etc...)	Diagnostic	Dépollution
	2100 m ³	3600 m ³
Estimation locale (localisation des zones les plus polluées)	Non renseigné.	
Appréciation du donneur d'ordre sur ces résultats	Sous-estimation, inacceptable.	
Appréciation du BE ou de la société de dépollution sur ces résultats	Sans commentaire. Profil bas.	
Impacts des écarts éventuels	Surcoûts importants.	

Avis d'expert sur les raisons des écarts ou similitudes observés entre estimations de diagnostic et résultats de dépollution

Liste hiérarchisée des éléments pouvant expliquer les écarts ou la similitude des résultats	<p><u>Avis du BE ayant réalisé l'étude :</u> Densité de sondages insuffisante pour n'importe quelle méthode d'estimation.</p> <p><u>Avis de l'équipe de projet de la présente étude RECORD :</u> L'erreur d'estimation est de 42% en sous-estimation. On ne dispose que de peu d'informations pour apprécier les facteurs à l'origine de cet écart plus élevé que la moyenne :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Le cas est très complexe (sachant que tous les sites de l'étude sont complexes), car plusieurs types de substances (HC, BTEX) et plusieurs types de terrain doivent être dépollués. Une erreur d'estimation plus élevée que celle pouvant être attendue d'un cas plus simple, doit de ce fait
---	--

	<p>être acceptée.</p> <ul style="list-style-type: none"> - La densité de sondages est extrêmement basse avec 1 sondage pour 1800 m² (soit nettement inférieure au 1 pour 100 m² recommandé), et l'échantillonnage sur la verticale est orienté, ce qui ne favorise pas une bonne estimation. - L'estimation a été réalisée par un jugement d'expert seul. - La fiabilité des résultats de dépollution n'est pas connue.
<p>Suggestion d'amélioration des estimations (diagnostic/dépollution)</p>	<p><u>Avis du BE ayant réalisé l'étude :</u> Densité de caractérisation insuffisante.</p> <p><u>Avis de l'équipe de projet de la présente étude RECORD :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Augmenter la densité de sondages, assurer l'homogénéité des conditions de prélèvement et le recouvrement complet de la zone par un maillage régulier ou systématique aléatoire de sondages, ainsi que des prélèvements systématiques sur la verticale. - Compléter le jugement d'expert par une méthode d'interpolation.

Site T – Ancien dépôt pétrolier – Hydrocarbures et HAP – Excavation

<i>Caractéristiques générales</i>	
Activité(s) à l'origine de la pollution – Période(s) d'activité	Dépôt pétrolier – Usine de fabrication de bitumes et dépôt de produits blancs Jusqu'en 1996
Surface du site (parcelle(s))	10 000 m ²
Types de substances justifiant une dépollution	Hydrocarbures lourds, HAP
Gammes de concentrations par milieu atteint (sol, eau souterraine, eau surface, air intérieur, sédiments,...)	240 000 mg/kg ms en HCT (C ₁₀ -C ₄₀) 8 800 mg/kg ms en HAP totaux (16 HAP de la liste US EPA) 310 mg/kg ms en BTEX Absence d'indices d'HC volatils dans l'air interstitiel des sols
Types de terrains atteints par la pollution	Marnes jusqu'à 1-1.5 m maxi, parfois absentes Calcaires durs
Caractéristiques de la (des) nappe (s) atteinte (s) par la pollution	Nappe vulnérable présente au droit du site vers 11-12m de profondeur
Occupation du site et de ses environs	Zone industrielle

<i>Etudes et travaux réalisés sur le site pollué</i>	
2003	ESR, 57 tranchées entre 2 et 3 m de profondeur + 5 piézomètres à 15-16 m de profondeur
2004	Suivi de la qualité des eaux, impact avéré en hydrocarbures
2007	Diagnostic complémentaire des sols et des eaux souterraines
2009	Excavation des terres polluées. Arrêt du chantier à la demande du donneur d'ordre.
2010	Dossier d'ouvrage exécuté et Investigations complémentaires sur la partie « Dépôt » du site (Phase 2)

<i>Caractéristiques de la dépollution</i>	
Type(s) de dépollution	Excavation
Technique(s) de dépollution	Excavation, tri, évacuation (biocentre, ISDD, désorption thermique, incinération)
Description détaillée des objectifs fixés à la dépollution	Retrait des zones à imprégnations de bitume <ul style="list-style-type: none"> - Remblaiement de surface : HCT < 1000 mg/kg - Remblaiement au-delà d'1m : HCT < 2500 mg/kg et HAP < 360 mg/kg - Biocentre : entre 2500 et 35000 mg/kg en HCT, HAP < 260 mg/kg - Désorption thermique : HCT > 35000 mg/kg ou HAP > 260 mg/kg - Centre d'incinération : terres bitumineuses et fûts souillés

<i>Estimations des quantités et localisation de la pollution en diagnostic</i>	
Type de méthode d'estimation utilisée	Jugement d'expert basé sur diagnostic complémentaire 2007. 7 zones initiales à réhabiliter, 2205 m ² , jusqu'à 1 à 2.5 m de

	profondeur + une anomalie à -7 m → terrassement prévu : 3000 m ³								
Méthode précise d'estimation	Patatoïde fermé par les sondages sans pollution en « worst case »								
Spécificités des données utilisées	<table border="1"> <tr> <td>Nombre</td> <td>Diagnostic complémentaire de 2007 : - 28 sondages entre 0.9 et 3 m de profondeur (avant-trou à tarière manuelle puis pelle mécanique par passes de 50 cm) - 7 tranchées autour de l'ancienne carrière, au droit d'anomalies conductimétriques (pelle mécanique par passes de 50 cm)</td> </tr> <tr> <td>Types</td> <td>Analyses au laboratoire des hydrocarbures adsorbés C₅-C₁₀ et C₁₀-C₄₀, BTEX pour certains, HAP pour certains, TPH sur 4 sondages.</td> </tr> <tr> <td>Support</td> <td>Échantillons présentant des indices de pollution analysés en priorité Échantillons prélevés en fonction des horizons reconnus et des singularités organoleptiques</td> </tr> <tr> <td>Répartition dans l'espace</td> <td>Irrégulier, zones non renseignées, clusters</td> </tr> </table>	Nombre	Diagnostic complémentaire de 2007 : - 28 sondages entre 0.9 et 3 m de profondeur (avant-trou à tarière manuelle puis pelle mécanique par passes de 50 cm) - 7 tranchées autour de l'ancienne carrière, au droit d'anomalies conductimétriques (pelle mécanique par passes de 50 cm)	Types	Analyses au laboratoire des hydrocarbures adsorbés C ₅ -C ₁₀ et C ₁₀ -C ₄₀ , BTEX pour certains, HAP pour certains, TPH sur 4 sondages.	Support	Échantillons présentant des indices de pollution analysés en priorité Échantillons prélevés en fonction des horizons reconnus et des singularités organoleptiques	Répartition dans l'espace	Irrégulier, zones non renseignées, clusters
	Nombre	Diagnostic complémentaire de 2007 : - 28 sondages entre 0.9 et 3 m de profondeur (avant-trou à tarière manuelle puis pelle mécanique par passes de 50 cm) - 7 tranchées autour de l'ancienne carrière, au droit d'anomalies conductimétriques (pelle mécanique par passes de 50 cm)							
	Types	Analyses au laboratoire des hydrocarbures adsorbés C ₅ -C ₁₀ et C ₁₀ -C ₄₀ , BTEX pour certains, HAP pour certains, TPH sur 4 sondages.							
	Support	Échantillons présentant des indices de pollution analysés en priorité Échantillons prélevés en fonction des horizons reconnus et des singularités organoleptiques							
	Répartition dans l'espace	Irrégulier, zones non renseignées, clusters							
Suivi des eaux : non détaillé ici (absence d'impact).									
Données indirectes utilisées dans l'estimation ?	Données utilisées pour caractériser la pollution, mais non utilisées pour estimer les volumes et zones polluées en Diag : <ul style="list-style-type: none"> - Photoiniseur : présence de volatils dans l'air interstitiel, exprimé en équivalent benzène, pour chaque échantillon (peu utile pour le recherche de bitume...) - Deux cartes de résistivité (0-3m et 0-6m), cf. figure : anomalies électromagnétiques, correspondant à des fûts (→ tranchées) 								

Estimations des quantités et localisation de la pollution en dépollution

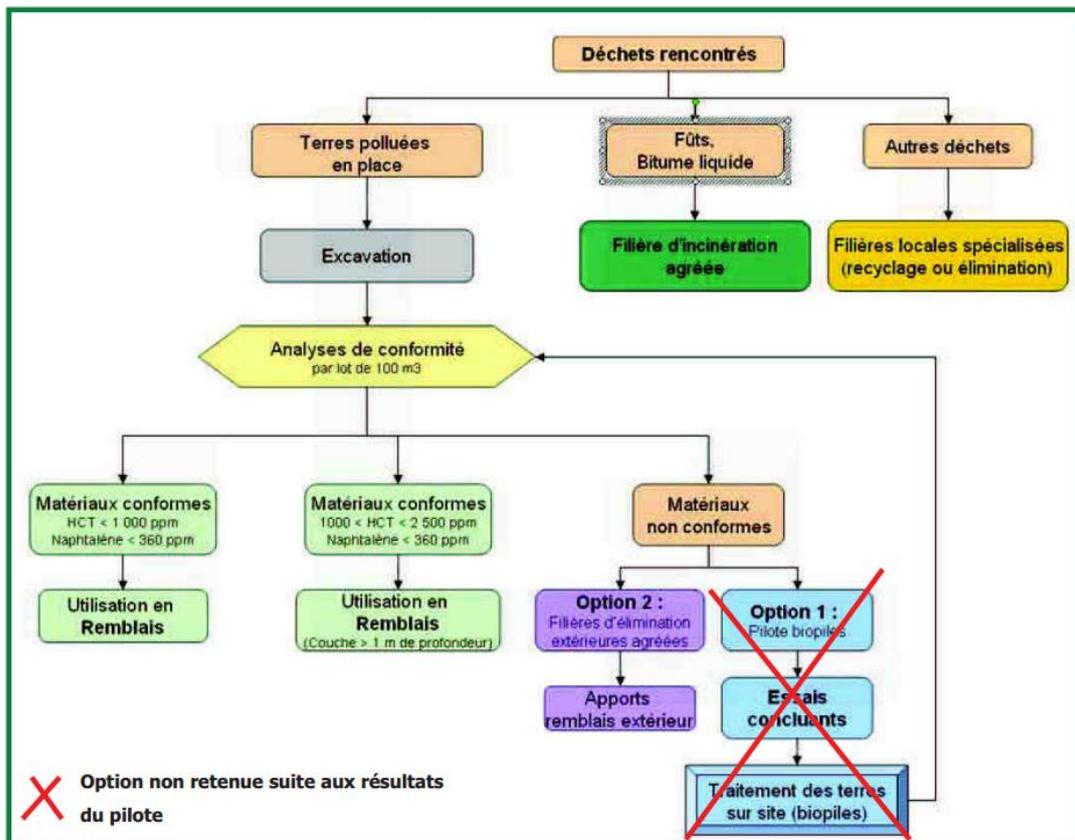
Méthode d'estimation utilisée	Calcul de volumes impactés puis de tonnages
Spécificités des données utilisées	<ul style="list-style-type: none"> - Matériaux excavés par maille répartis sur l'aire de stockage par lots de 100 m³ pour analyse (cf. organigramme) - 3/8-4/9/2009 : 2035 m³ excavés - Arrêt de chantier suite à la découverte de matériaux impactés en dehors des zones préalablement établies - Investigations complémentaires et nouvelles zones impactées définies : 21 sondages à la pelle mécanique - 14/9-27/10/2009 : 2900 m³ excavés (sains + pollués) - 26 prélèvements envoyés pour analyses (HCT, HAP, BTEX) + 4 analyses sur béton - 50 analyses sur flancs et fonds de fouille (validation travaux)

Comparaison des estimations de diagnostic et résultats de dépollution

Estimation globale (masses de polluants, volumes ou tonnages de terres par filière, etc...)	Les comparaisons ci-dessous correspondent à des volumes à terrasser puis excavés, incluant à la fois aux différents exutoires mais également saines (accessibilité).	
	Diagnostic 3000 m ³	Dépollution 4935 m ³ (2035 m ³ excavés avant arrêt + 2900 m ³ suite aux investigations complémentaires)
Estimation locale (localisation des zones les plus polluées)	Excavation, tri et stockage des matériaux par lots de 100 m ³ sur base du zonage BE (10 x 10 m) Fosses maçonnées (bitume) découvertes en cours de travaux.	
Appréciation du donneur d'ordre sur ces résultats	Fort écart – Mal accepté. Sur 3000 m ³ prévus, 2035 m ³ ont été sortis et même pas le tiers du site traité. Le donneur d'ordre a arrêté le chantier et fait conduire des investigations complémentaires montrant que 3500 m ³ restent encore à retirer (finalement 2900 m ³). La géophysique n'a pas détecté des fosses à goudron bétonnées. Il faudrait soigner les diagnostics avec un maillage resserré et des tranchées.	
Appréciation du bureau d'étude/de la société de dépollution sur ces résultats	Technique utilisée (électrique) inopérante pour la détection de bitume pur.	
Impacts des écarts éventuels	Arrêt des travaux avant réhabilitation complète du site. Les travaux n'ont pas repris à ce jour.	

Avis d'expert sur les raisons des écarts ou similitudes observés entre estimations de diagnostic et résultats de dépollution

Liste hiérarchisée des éléments pouvant expliquer les écarts ou la similitude des résultats	<p><u>Avis du donneur d'ordre :</u> Difficile de comparer : t / m³, différents exutoires etc. Mauvaise géophysique Mauvais diagnostic Les fosses à bitumes placées sous 2 m de terrain naturel ont trompé divers investigateurs</p> <p><u>Avis de l'équipe de projet de la présente étude RECORD :</u> L'erreur d'estimation est forte : 39% en sous-estimation!</p>
Suggestion d'amélioration des estimations (diagnostic/dépollution)	<p><u>Avis du BE ayant réalisé l'étude :</u> Augmenter localement le nombre de sondages sols et utiliser la pelle mécanique.</p> <p><u>Avis de l'équipe de projet de la présente étude RECORD :</u> La forte hétérogénéité de la pollution (boulettes) rend pertinent le recours à la pelle mécanique et doit inciter à prévoir un tri important des matériaux en cours de dépollution.</p>



Site U – Dépôt pétrolier et usine de bitumes émulsionnés – Hydrocarbures lourds et HAP – Excavation + Traitement sur site (Biopile)

<i>Caractéristiques générales</i>	
Activité(s) à l'origine de la pollution – Période(s) d'activité	Dépôt de stockage de produits pétroliers et usine de bitumes émulsionnés Début des années 60 – 2002
Surface du site (parcelle(s))	20 000 m ²
Types de substances justifiant une dépollution	Hydrocarbures pétroliers, HAP
Gammes de concentrations par milieu atteint (sol, eau souterraine, eau surface, air intérieur, sédiments,...)	HCT : 8000 mg/kg HAP : 310 mg/kg (naphtalène)
Types de terrains atteints par la pollution	Remblais ou terre végétale sur ~1m 1.5m de limons bruns 30 à 60 cm de sables noirs volcaniques Argiles calcaires
Caractéristiques de la (des) nappe (s) atteinte (s) par la pollution	Nappe très superficielle (~2m ?)
Occupation du site et de ses environs	A l'époque des travaux : zone industrielle.

<i>Études et travaux réalisés sur le site pollué</i>	
Mars 1997 - 1	Résultats préliminaires, Proposition d'excavation des terres
Juillet 1997 - 2	Complément diagnostic phase B
Septembre 1999 - 3	Complément d'étude
Avril 2006 - 4	Diagnostic environnemental
Décembre 2006 - 5	Diagnostic environnemental
Mai 2008 - 6	Diagnostic complémentaire des sols
Juillet 2008 - 7	Reconnaissance géophysique

<i>Caractéristiques de la dépollution</i>	
Type(s) de dépollution	Excavation puis Traitement sur site en biopile (en andin).
Technique(s) de dépollution	Traitement biologique sur site (biopile)
Description détaillée des objectifs fixés à la dépollution	1000 mg/kg en HCT et 170 mg/kg en Naphtalène (2008)

<i>Estimations des quantités et localisation de la pollution en diagnostic</i>	
Type de méthode d'estimation utilisée	Jugement d'expert
Méthode précise d'estimation	Délimitation manuelle des zones à excaver, sur base des données de sondages (86) et mesures géophysiques (EM)
Spécificités des données utilisées	<u>Première investigation - Mars 1997 :</u> <ul style="list-style-type: none"> - 4 piézomètres, nappe peu impactée - 42 sondages - Odeurs et mesures de gaz du sol - 8 échantillons (HCT < 5000 mg/kg)

	<ul style="list-style-type: none"> - 4 sources primaires de pollution mises en évidence + 2 zones à proximité de cuves enterrées <ul style="list-style-type: none"> o 80 m³ (0.5 à 1.5m de prof) o <10m³, sur 1.6m de prof o Hypothèse de 20 m³, difficile à estimer, jusqu'à 1.7m → 110m³ (200 tonnes) au total, envoi prévu en CET 2 <p><u>Troisième investigation - Septembre 1999 :</u> piézomètres supplémentaires</p> <p><u>4^{ème} et 5^{ème} investigations - 2006 :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - 14 sondages à la tarière jusqu'à 3 m - 28 prélèvements de sols avec indications organoleptiques <p><u>6^{ème} investigation - Mai 2008 :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - 14 sondages à la pelle mécanique, entre 1.5 et 2.5 m de profondeur au droit des zones non investiguées / Échantillons prélevés en fonction des horizons et des indices organoleptiques (~1,5 m) : C₅-C₁₀, C₁₀-C₄₀, BTEX et HAP - Vapeurs d'hydrocarbures : tubes colorimétriques type Dräger, une mesure par sondage - Photoioniseur, calibré sur le benzène, pour chaque sondage → Pour tous ces sondages, aucun impact ! <p><u>Etude géophysique de 2008 :</u> absence d'anomalie électromagnétique au droit du site, aucune zone d'enfouissement de déchets mise à jour. A noter : la géophysique a été totalement inefficace sur cette pollution au bitume.</p>
Données indirectes utilisées dans l'estimation ?	Non pas de manière explicite.

Estimations des quantités et localisation de la pollution en dépollution

Méthode d'estimation utilisée	Tri des terres et analyses fond/bord de fouilles
Spécificités des données utilisées	Anciens diagnostics. Sondages mal positionnés pour la plupart.

Comparaison des estimations de diagnostic et résultats de dépollution

Estimation globale (masses de polluants, volumes ou tonnages de terres par filière, etc...)	Diagnostic	Dépollution
	1470 m³	853 m³
Estimation locale (localisation des zones les plus polluées)	Non renseigné.	
Appréciation du donneur d'ordre sur ces résultats	Quantités à dépolluer moindres que prévu. Comme le traitement était sur site, cela n'a pas eu de conséquences financières. La géophysique ne sera plus préconisée sur des pollutions au bitume.	
Appréciation du bureau d'étude/de la société de dépollution sur ces résultats	Pas d'avis du prestataire. La surestimation semble liée au hasard.	
Impacts des écarts éventuels	Pas d'impact du fait du traitement sur site.	

Avis d'expert sur les raisons des écarts ou similitudes observés entre estimations de diagnostic et résultats de dépollution

Liste hiérarchisée des éléments pouvant expliquer les écarts ou la similitude des résultats	<u>Avis du BE ayant réalisé l'étude :</u>
---	---

	<p>Pas assez d'éléments sur la dépollution pour pouvoir expliquer les différences (beaucoup moins de volume que prévu).</p> <p>Comment les volumes ont été estimés en Diag (à partir de l'étude de 1997 ?)</p> <p>Diagnostic réalisé en plusieurs phases, sur plus de 10 ans d'intervalle (1997-2008).</p> <p>Implantation imprécise des sondages (pertes d'information, erreurs de positionnement...).</p> <p><u>Avis de l'équipe de projet de la présente étude RECORD :</u></p> <p>L'erreur d'estimation est très forte : 72% en surestimation. Or l'étude cumule des éléments particulièrement défavorables à une bonne estimation des volumes :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Le cas est très complexe (sachant que tous les sites de l'étude sont complexes), car plusieurs types de substances (HC, HAP) et plusieurs types de terrain doivent être dépollués. De plus, l'étude RECORD montre que ce sont les cas de pollution aux HAP qui présentent les plus grandes erreurs d'estimation. Ce type de pollution est donc particulièrement difficile à estimer, quels que soient les méthodes d'estimation et les efforts d'échantillonnage entrepris. - La densité de sondages est de 1 pour 286 m² (soit nettement inférieure au 1 pour 100 m² recommandé), le recouvrement de la zone d'intérêt n'est pas assuré par les sondages (zones sur- et sous-échantillonnées), le protocole de prélèvement est hétérogène et l'échantillonnage sur la verticale est orienté. Le nombre d'échantillons sur la verticale n'est pas connu. - L'estimation a été réalisée par un jugement d'expert seul.
<p>Suggestion d'amélioration des estimations (diagnostic/dépollution)</p>	<p><u>Avis du BE ayant réalisé l'étude :</u></p> <p>Réaliser un levé précis (géomètre) des points de sondage.</p> <p>Base de données + SIG+ géostatistique (si produits blancs)</p> <p><u>Avis de l'équipe de projet de la présente étude RECORD :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Augmenter la densité de sondages, assurer l'homogénéité des conditions de prélèvement et le recouvrement complet de la zone par un maillage régulier ou systématique aléatoire de sondages, ainsi que des prélèvements systématiques sur la verticale. - Compléter le jugement d'expert par une méthode d'interpolation.

Site V – Ancienne usine de bitumes et émulsions – Hydrocarbures pétroliers lourds et HAP – Excavation

<i>Caractéristiques générales</i>	
Activité(s) à l'origine de la pollution – Période(s) d'activité	Usine de bitumes et émulsions Arrêt en 1995
Surface du site (parcelle(s))	4 690 m ²
Types de substances justifiant une dépollution	Hydrocarbures pétroliers lourds, HAP
Gammes de concentrations par milieu atteint (sol, eau souterraine, eau surface, air intérieur, sédiments,...)	Indice hydrocarbures totaux (HCT) max = 140 000 mg/kg ms Somme des 16 HAP US EPA (HAP) max = 1 500 mg/kg ms
Types de terrains atteints par la pollution	Remblais de 0.4 à 0.7 m Limons argileux -> 3 à 4 m Sables graveleux et limoneux sur au moins 2 m
Caractéristiques de la (des) nappe (s) atteinte (s) par la pollution	Nappe entre 3 et 4 m, peu d'impacts
Occupation du site et de ses environs	Entrée d'un village entre route et voie ferrée

<i>Etudes et travaux réalisés sur le site pollué</i>	
1999	Evaluation simplifiée des risques (ESR)
Novembre 2003	Diagnostic complémentaire de pollution
Août 2009	Investigations complémentaires
Avril 2010	Plan de gestion
2010	Travaux de dépollution – première phase par première entreprise
2011	Bilan coûts-avantages
2012	Travaux de dépollution – seconde phase par seconde entreprise

<i>Caractéristiques de la dépollution</i>	
Type(s) de dépollution	Excavation, tri, évacuation des bitumes en centre de traitement de déchets spéciaux.
Technique(s) de dépollution	
Description détaillée des objectifs fixés à la dépollution	HCT < 1000 mg/kg ms sur le 1 ^{er} mètre, < 2500 en deçà (suite au diag de 2009)

<i>Estimations des quantités et localisation de la pollution en diagnostic</i>	
Type de méthode d'estimation utilisée	Jugement d'expert ou interpolation linéaire « Les volumes des terres polluées qui devront être dirigées vers des filières de traitement spécifique ont été déterminés en fonction des résultats des différentes campagnes de sondages (résultats analytiques et coupes de sondage). » Patatoïde de surface attribué par sondage : probablement une interpolation linéaire ou « jugement d'expert » pour l'ensemble des phases de diagnostic.
Méthode précise d'estimation	Pour chaque sondage = surface * profondeur

Spécificités des données utilisées	Deux zones sources identifiées à la suite de l'ESR de 1999 : <ul style="list-style-type: none"> - source 1 : fabrication, volume estimatif 20m³ - source 2 : stockage, volume estimatif 400m³ 	
	Nombre	<u>Données avant 2003 :</u> - 12 sondages <u>Diagnostic complémentaire 2003 :</u> - 22 sondages complémentaires (tractopelle) jusqu'à 1.5-3.5 m : 6 proches de source 1, 13 au droit de source 2, 2 de vérification dans une zone potentiellement contaminée, 1 de vérification hors zone potentiellement contaminée. - 41 échantillons (22 dans remblais, 19 dans limons), prélevés tous les 0.5 m ou à chaque changement de faciès : description organoleptique, mesure PID des COV, analyses labo HCT et HAP <u>Investigations complémentaires de 2009 :</u> - 21 sondages complémentaires à 3 m de profondeur (tarière hydraulique). - échantillons prélevés en fonction des horizons et des observations organoleptiques, au minimum tous les 1 m. - 1 piézomètre à 6 m et 3 piézaires à 1.5 m.
	Types	C ₅ -C ₁₀ , HCT (C ₁₀ -C ₄₀), BTEX, HAP, 8 métaux
	Support	Échantillon considéré représentatif d'une tranche de sol présentant globalement les mêmes caractéristiques.
	Répartition dans l'espace	
Données indirectes utilisées dans l'estimation ?	Photoioniseur calibré sur le benzène + Tubes colorimétriques (Dräger), mais non utilisés pour l'estimation	

<i>Estimations des quantités et localisation de la pollution en dépollution</i>	
Méthode d'estimation utilisée	Géométrique / patatoïdes
Spécificités des données utilisées	Les données des premiers sondages étaient biaisées (pas assez profonds), car les bitumes étaient recouverts de sédiments propres. En outre raisonner en concentration pour calculer les volumes n'est pas une bonne méthode du fait de la nature « Tout ou Rien » des boulettes.

<i>Comparaison des estimations de diagnostic et résultats de dépollution</i>		
Estimation globale (masses de polluants, volumes ou tonnages de terres par filière, etc...)	Diagnostic	Dépollution
	3070 t	4 200 t
Estimation locale (localisation des zones les plus polluées)	N/A	
Appréciation du donneur d'ordre sur ces résultats	Sous-estimation des volumes de 27 %. Chantier de la première phase de dépollution arrêté par le donneur d'ordre. Résultats jugés inacceptables.	
Appréciation du bureau d'étude/de la	Observations et bilan quantitatif de la première phase de	

société de dépollution sur ces résultats	<p>réhabilitation des sols de fin 2010 :</p> <p>Au terme de la première phase de travaux, réalisée uniquement sur les zones 2 et 3 en raison de l'arrêt du chantier, il a été relevé en particulier les points suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Zone 2 : <ul style="list-style-type: none"> o le pourcentage de terres polluées nécessitant une stabilisation avant stockage en ISDD (installation de stockage de déchets inertes), estimé initialement à environ 3 %, a été au final de l'ordre de 50 % ; o <u>la pollution a été retrouvée à une profondeur plus importante</u> que celle prévue avant travaux (- 0.8 m voire - 2.2 m au lieu d'une profondeur moyenne estimée initialement à - 0.5 m par rapport au T.N. dans le plan de gestion) ; o les sols en sous-face de la route traversant la zone ont nécessité des travaux de réhabilitation, <u>ce qui n'avait pas été pris en compte lors des estimations initiales.</u> - Zone 3 : <ul style="list-style-type: none"> o en partie sud-est de la zone, la pollution a été relevée sur une <u>profondeur plus importante</u> que celle prévue initialement c'est-à-dire, au-delà de - 1 m / T.N, et les contrôles de flancs de fouille (non réceptionnés) ont mis en évidence une extension de la pollution vers l'est, c'est-à-dire vers la zone 1. <p>Note du tiers expert : une concentration des sols en bitume n'a pas de sens en soi car il s'agit toujours d'une boulette de produit pur mélangée par l'opérateur à une teneur très variable de sols.</p>
Impacts des écarts éventuels	<p>Surcoûts et retards, (entre 46 et 76 %). 3 Diagnostics complémentaires ont été nécessaires. Tests de criblage et d'inertage à la chaux.</p> <p>BE décrédibilisé.</p>

Avis d'expert sur les raisons des écarts ou similitudes observés entre estimations de diagnostic et résultats de dépollution

Liste hiérarchisée des éléments pouvant expliquer les écarts ou la similitude des résultats	<p><u>Avis du BE ayant réalisé l'étude :</u></p> <p>Mauvais diagnostic en densité. Caractère en « tout ou rien » de la pollution non prise en compte. Sondages d'investigation pas assez profonds pour trouver les fosses dans le terrain naturel et recouvertes de remblais.</p> <p><u>Avis de l'équipe de projet de la présente étude RECORD :</u></p> <p>L'erreur d'estimation est de 27% en surestimation. Or l'étude juxtapose des éléments favorables et défavorables à une bonne estimation des volumes :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Le cas est relativement peu complexe (sachant que tous les sites de l'étude sont complexes), avec un seul type de substances (HC) et un seul type de terrain. - Les conditions d'investigation sont plutôt favorables à une bonne estimation. La densité de sondages est de 1 pour 85 m² (soit supérieure au 1 pour 100 m² recommandé), le nombre d'échantillons sur la verticale est de 1 pour 1 m, et les échantillons sont prélevés systématiquement et de manière orientée sur la verticale. La répartition spatiale des sondages n'est pas connue. Le protocole de prélèvement hétérogène est en revanche défavorable. - L'estimation a été réalisée par un jugement d'expert seul. - La fiabilité des résultats de dépollution n'est pas connue, car aucune information n'est disponible sur les contrôles effectués lors de l'excavation des sols.
Suggestion d'amélioration des	<u>Avis du BE ayant réalisé l'étude :</u>

estimations (diagnostic/dépollution)	<p>Diagnostic à baser sur de grandes tranchées, peu de sondages. Ne pas se limiter aux seuls remblais et regarder dessous. En dépollution considérer des grandes mailles avec criblage et stockage en tas avant élimination.</p> <p><u>Avis de l'équipe de projet de la présente étude RECORD :</u></p> <ul style="list-style-type: none">- Un protocole de prélèvement homogène et un recouvrement de la zone d'intérêt par des sondages organisés selon un maillage régulier ou systématique aléatoire contribueraient à l'amélioration de l'estimation.- Le jugement d'expert pourrait être complété par une méthode d'interpolation.
--------------------------------------	---

<i>Caractéristiques générales</i>	
Activité(s) à l'origine de la pollution – Période(s) d'activité	Usine de bitume. Cette usine aurait été elle-même construite sur les remblais d'une autre démolie.
Surface du site (parcelle(s))	8900 m ²
Types de substances justifiant une dépollution	Hydrocarbures lourds et HAP, provenant de bitumes et fûts enterrés
Gammes de concentrations par milieu atteint (sol, eau souterraine, eau surface, air intérieur, sédiments,...)	Comprises entre 500 et > 100 000 mg/kg de HCT du fait de la présence de produits purs en boulette dans les sols ou de fûts, pour lesquels la valeur de concentrations apporte peu d'intérêt vu la nature du polluant.
Types de terrains atteints par la pollution	Remblais jusqu'à 1.5 m Marnes grises avec lits de gravier
Caractéristiques de la (des) nappe (s) atteinte (s) par la pollution	Nappe alluviale entre 1.5 et 3 m de profondeur, peu impactée.
Occupation du site et de ses environs	Berges de fleuve Peu sensible

<i>Etudes et travaux réalisés sur le site pollué</i>	
Octobre 2006	Diagnostic des sols
2007-2010	Dépollution en plusieurs phases

<i>Caractéristiques de la dépollution</i>	
Type(s) de dépollution	Excavation / Bio-traitement
Technique(s) de dépollution	Nouvelle technique mise au point par le BE pour gérer les pépites. Le sol est excavé puis criblé et mis en tas. Les tas sont ré-échantillonnés plusieurs fois (car les polluants migrent dans les tas !) avant décision du devenir.
Description détaillée des objectifs fixés à la dépollution	Dépollution dès que HCT > 500 mg/kg ms Sols réutilisables si HCT < 500 mg/kg ms Sols excavés en biocentre si HCT > 500 mg/kg ms Produits purs envoyés en Centre d'incinération

<i>Estimations des quantités et localisation de la pollution en diagnostic</i>	
Type de méthode d'estimation utilisée	Géostatistique
Méthode précise d'estimation	Approche géostatistique pour les hydrocarbures
Spécificités des données utilisées	

	Nombre	46 sondages carottés dont 11 le long des berges 39 échantillons analysés
	Types	Analyses au laboratoire des C ₅ -C ₁₀ , C ₁₀ -C ₄₀ , BTEX et HAP
	Support	Échantillons analysés en fonction des horizons et des singularités organoleptiques
	Répartition dans l'espace	Maillage 15x15 m

Données indirectes utilisées dans l'estimation ?	Nombre	Sur toutes les mailles 15x15 m
	Types	Photoioniseur (PID) : présence de volatils, calibré sur le benzène
	Support	
	Conditions d'intégration dans l'estimation	Intégrées à l'aide de droites de régression Pas de cokrigeage

Points à vérifier (info. Interne à Geovariances-eOde)	Variographie avec anisotropie horizontale/verticale	
	Y a-t' il eu transformation/back-transformation des données en distribution gaussienne ?	Oui : transformation gaussienne puis back-transformation
	Dégrouper réalisé en cas de clusters ?	Non renseigné
	Vérifier si un changement de support diag-dépol a été modélisé.	Non Maillage pour cartographie uniquement : 1x1x0,25 m Pas de prise en compte du support de la dépollution
	En cas d'excavation des sols, un facteur de foisonnement des sols a-t' il été appliqué dans l'estimation ?	Non renseigné

<i>Estimations des quantités et localisation de la pollution en dépollution</i>	
Méthode d'estimation utilisée	Tri visuel, analyses en fonds et parois de fouilles. Rq. : Le MO ne peut transmettre les rapports historiques de ses sites à des tiers.
Spécificités des données utilisées	Teneur en HCT malgré leur peu de fiabilité sur ce type de site

Comparaison des estimations de diagnostic et résultats de dépollution

Estimation globale (masses de polluants, volumes ou tonnages de terres par filière, etc...)	Diagnostic	Dépollution
	12 780 m ³	8 293 m ³
	Le volume estimé en diagnostic est obtenu par un seuillage d'une carte de dépassement local de seuil de dépollution à un niveau de risque égal à 5%.	
Estimation locale (localisation des zones les plus polluées)	Non renseigné	
Appréciation du donneur d'ordre sur ces résultats	Inacceptable car surestimé. La présentation de volumes précis mais finalement peu réalistes a déplu. Par contre, le krigeage est jugé intéressant pour orienter les excavations.	
Appréciation du bureau d'étude/de la société de dépollution sur ces résultats	Le BE n'a pas émis d'avis.	
Impacts des écarts éventuels	Pas d'impact du fait du protocole d'excavation optimisé. Seul le krigeage a été utilisé par la suite.	

Avis d'expert sur les raisons des écarts ou similitudes observés entre estimations de diagnostic et résultats de dépollution

Liste hiérarchisée des éléments pouvant expliquer les écarts ou la similitude des résultats	<p><u>Avis du BE ayant réalisé l'étude :</u></p> <p>Difficultés à travailler avec des teneurs sur une pollution en « tout ou rien ». Il faudrait sans doute se baser sur la géostatistique des « prospecteurs de diamants » mais ceux-ci ne calculent pas de volumes.</p> <p>Le volume estimé en diagnostic est obtenu par un seuillage d'une carte de dépassement local de seuil de dépollution à un niveau de risque égal à 5%. Cela signifie que 12 780 m³ de terres présentent plus de 5% de risque de dépasser le seuil ; par construction, ce volume est très vraisemblablement majorant.</p> <p>A titre d'information, le tableau ci-contre fournit les volumes correspondant à plusieurs niveaux de risque. On note que le volume diminue notablement avec l'augmentation du risque toléré de laisser en place des sols dépassant potentiellement les objectifs de réhabilitation.</p> <p>Cette méthode de calcul fournit le volume dont il faudrait envisager l'excavation pour s'affranchir du risque de laisser en place des terres contaminées. Ce volume, qui inclut une part non négligeable de terres qui se révéleront au final saines, n'est pas adapté pour estimer la quantité de sols contaminés en place. Un calcul de volumes global à partir des simulations aurait dû être réalisé. Il aurait vraisemblablement fourni une prédiction volumique plus cohérente avec la réalité de la dépollution.</p>
	<p><u>Avis de l'équipe de projet de la présente étude RECORD :</u></p> <p>L'erreur d'estimation est forte (54% en surestimation). Or plusieurs facteurs sont défavorables à une bonne estimation :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Le cas est moyennement complexe (sachant que tous les sites de l'étude sont complexes), avec un seul type de substances (HAP) en terrain hétérogène. L'étude RECORD montre néanmoins que ce sont les cas de pollution aux HAP qui présentent les plus grandes erreurs d'estimation. Ce type de pollution est donc particulièrement difficile à estimer, quels que soient les méthodes d'estimation et les efforts d'échantillonnage entrepris.

Risque associé :	Terres pouvant présenter des traces de goudrons : Tout le site
5 %	12 780 m ³
10 %	8 640 m ³
15 %	6 570 m ³
20 %	5 150 m ³

	<ul style="list-style-type: none"> - 2 des 5 facteurs identifiés comme éléments favorables à la réduction des écarts en investigation ne sont pas remplis : la densité de sondages est de 1 pour 193 m², au lieu d'un minimum de 1 pour 100 m², et l'échantillonnage sur la verticale est orienté. Le nombre d'échantillons par m sur la verticale n'est pas connu. - L'estimation a été réalisée par une méthode géostatistique, mais avec des erreurs théoriques : le changement de support investigation-dépollution n'a notamment pas été pris en compte <p>La fiabilité des résultats de dépollution est moyenne car seuls des contrôles analytiques ont été réalisés en fond et bordure de la zone d'intérêt.</p>
<p>Suggestion d'amélioration des estimations (diagnostic/dépollution)</p>	<p><u>Avis du BE ayant réalisé l'étude :</u></p> <p>Prise en compte du support de dépollution (envisagé dans le rapport) et des différentes filières.</p> <p>Avoir une approche d'investigation plus qualitative que quantitative au moyen de rainurages à la pelle mécanique. Les sondages sont trop ponctuels et ne permettent pas de détecter des fûts par exemple.</p> <p><u>Avis de l'équipe de projet de la présente étude RECORD :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Augmenter la densité d'échantillonnage et l'homogénéité de prélèvement et de recouvrement de la zone d'intérêt (échantillonnage systématique sur la verticale, selon un protocole systématique), - Améliorer l'estimation géostatistique, au minimum par une modélisation du changement de support. - Augmenter la fiabilité des résultats de dépollution en effectuant des contrôles analytiques à l'intérieur et en dehors de la zone d'intérêt.

Illustrations

